

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Patrik Berka

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra fyziky

Hodnocení antropogenní radioaktivity v životním prostředí
Anthropogenic Radioactivity in the Environment

Zadání bakalářské práce

Student:

Patrik Berka

Studijní program:

B0533A110023 Aplikovaná fyzika

Téma:

Hodnocení antropogenní radioaktivity v životním prostředí
Anthropogenic Radioactivity in the Environment

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

V bakalářské práci bude porovnávána radioaktivita nových vzorků z životního prostředí, jejíž existence je následkem antropogenní činnosti, s radioaktivitou vzorků, které byly získány před více než třiceti lety. Předpokládá se využití a) scintilační spektrometrie gama záření, b) statistických metod pro hodnocení spekter prostřednictvím vhodného softwaru. Bude verifikována hypotéza o poklesu měřené aktivity, která vyplývá z fyzikální teorie.

Seznam doporučené odborné literatury:

Atwood, D.A. Radionuclides in the Environment. John Wiley & Sons, 2010.
Gilmore, G.R. Practical Gamma-ray Spectrometry. John Wiley & Sons, 2008.
Knoll, G.F. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010.
Valkovic, V. Radioactivity in the Environment, Elsevier Science, 2019.

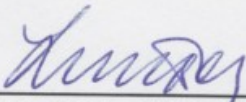
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

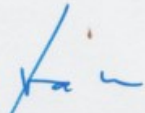
Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Radim Uhlář, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020




prof. Dr. RNDr. Jiří Luňáček
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení Studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Patrik Berka

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Mgr. Radimu Uhláři, Ph.D., za poskytnutí odborné literatury, za konzultace týkající se této bakalářské práce a za její vedení.

Za poskytnutí literatury bych rovněž chtěl poděkovat slečně Mojgan Abolghasem, MSc.

Poděkování za umožnění sběru vzorků z vybrané lokality a za poskytnutí starších dat pro srovnání s novým měřením patří panu Ing. Tomáši Brunclíkovi.

Poděkovat bych chtěl také panu Doc. Dr. RNDr. Petru Alexovi, a to za zpřístupnění laboratoře pro potřeby provedení praktické části mé práce.

Souhlas se zveřejněním práce

Název:

Hodnocení antropogenní radioaktivity v životním prostředí
Anthropogenic Radioactivity in the Environment

Autor: Patrik Berka

Znění souhlasu:

„Souhlasíme se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

V Brně dne: 11. května 2020



Ing. Tomáš Brunclík
Georadis s.r.o.

Abstrakt

Úkolem této bakalářské práce je měření aktivity antropogenních radionuklidů v životním prostředí. V lokalitě v blízkosti obce Bohuňov v okrese Svitavy byly odebrány vzorky půdy z několika vrstev. Použité detekční přístroje jsou zaměřeny na gama spektrometrii. Byla vyhodnocena hmotnostní aktivita radionuklidů ^{134}Cs a ^{137}Cs v půdě v závislosti na hloubce pod povrchem a plošná kontaminace těmito radionuklidy, včetně rozboru rychlosti prosakování cesia do hlubších vrstev půdy. Významná nehomogenita plošné kontaminace zkoumané lokality izotopy cesia znemožnila verifikaci platnosti zákona radioaktivní přeměny.

Klíčová slova

antropogenní radioaktivita; cesium-134; cesium-137; Černobyl; kontaminace; půdní profil; radioaktivita; radioaktivita v životním prostředí; radiocesium

Abstract

The objective of this bachelor thesis is the measurement of the activity of the anthropogenic radionuclides in the environment. Samples were collected from several layers of soil at a location close to Bohuňov municipality, in Svitavy district. Detection equipment provided specializes in gamma spectrometry. Specific activity of radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs was evaluated, depending on the depth below the surface, along with contamination of the surface by these radionuclides, including the analysis of migration rate of cesium into deeper layers of soil. Significant inhomogeneity of the surface contamination by the isotopes of caesium in the researched location had made the verification of radioactive decay law impossible.

Keywords

anthropogenic radioactivity; caesium-134; caesium-137; Chernobyl; contamination; radioactivity; radioactivity in the environment; radiocaesium; soil profile

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Seznam ilustrací	8
Seznam tabulek	9
Úvod.....	10
1 Kompendium teorie.....	11
1.1 Radioaktivní přeměny	11
1.2 Přirozená radioaktivita	13
1.2.1 Primordiální radionuklidy	14
1.2.2 Radionuklidy z přeměnových řad.....	14
1.2.3 Kosmogenní radionuklidy	15
1.3 Antropogenní radioaktivita	15
1.3.1 Jaderné zbraně	15
1.3.2 Havárie v Černobylské jaderné elektrárně	16
1.3.3 Havárie elektrárny Fukušima I.....	19
1.4 Vliv radioaktivity na člověka a životní prostředí	20
2 Zpracování měření	25
2.1 Měřicí přístroje.....	25
2.2 Půdní profil.....	27
2.3 Energetická kalibrace	31
2.3.1 Grafy spekter	33
2.4 Účinnostní kalibrace.....	40
2.4.1 Účinnostní kalibrace detektoru GC3018	40
2.4.2 Účinnostní kalibrace detektoru GWD-3023	41
2.4.3 Naměřená aktivita vzorků	42
2.5 Korekce hodnot aktivity na hustotu vzorků	43
2.6 Výpočet plošné kontaminace půdy izotopem ^{137}Cs	48
2.7 Data z měření provedených v roce 2015.....	51
2.7.1 Prosakování cesia hlouběji do půdy	53
3 Určení a výpočet nejistot.....	54
4 Závěr	58
Literatura	59

Seznam použitých symbolů a zkratk

A	Aktivita vzorku [Bq]
A_m	Aktivita vzorku přepočtena na hmotnost 1 kilogramu. [Bq·kg ⁻¹]
A_S	Plošná kontaminace [Bq·m ⁻²]
D	Polotloušťka [cm]
E	Energie fotonu [keV]
H	Tloušťka vrstvy půdy
Ch	Číslo kanálu v datovém výstupu softwarů použitých pro měření [-]
m_{ε}	Celková hmotnost nasbíraného čerstvého vzorku z dané vrstvy [g]
m_s	Celková hmotnost nasbíraného vzorku z dané vrstvy po sušení [g]
m	Hmotnost části daného vzorku umístěné do Marinelliho nádoby [g]
P_{γ}	Pravděpodobnost vyzáření fotonu energie E v porovnání s celým spektrem radionuklidu [%]
R	Počet registrovaných fotonů [-]
R_t	Počet fotonů registrovaných za sekundu [s ⁻¹]
R_m	Počet fotonů registrovaných za sekundu v kilogramu hmoty [s ⁻¹ ·kg ⁻¹]
T	Poločas přeměny [s], [h], [d], [a]
t_l	Doba měření vzorku v detektoru, tzv. life time [s]
V	Objem Marinelliho nádoby [cm ³]
ε	Účinnost detekce záření [-]
ρ_{ε}	Hustota čerstvé zeminy [kg·m ⁻³]
ρ_s	Hustota sušené zeminy [kg·m ⁻³]

Seznam ilustrací

Číslo	Název	Strana
1.1	Pravděpodobnost vzniku různých dceřiných jader při štěpění ^{235}U	12
1.2	Uran-radiová přeměnová řada	13
1.3	Thoriová přeměnová řada	13
1.4	Mapa kontaminace Evropy spadem ^{137}Cs k roku 1992	16
1.5	Zamoření nejvíce zasažené části Japonska ^{137}Cs po úniku radiace z Fukušimy I	18
1.6	Porovnání ročních dávek radiace na jednu osobu v roce 1998 podle zdroje ozáření	21
2.1	Laboratorní váhy použité pro zvážení všech nasbíraných vzorků	24
2.2	Fotografie detektorů GC3018 a GWD-3023	25
2.3	Mapa lesa, kde na místě označeném červenou kružnicí proběhl sběr vzorků.	26
2.4	Náčrt půdního profilu	27
2.5	Graf intervalu spektra vzorku vrstvy B4 od energie 600 keV do 800 keV	29
2.6	Graf radiačního pozadí detektoru GC3018	33
2.7	Graf radiačního pozadí detektoru GWD-3023	33
2.8	Graf spektra vzorku mechu	34
2.9	Graf spektra vzorku z vrstvy L1	34
2.10	Graf spektra vzorku z vrstvy L2	35
2.11	Graf spektra vzorku z vrstvy A	35
2.12	Graf spektra vzorku z vrstvy B1	36
2.13	Graf spektra vzorku z vrstvy B2	36
2.14	Graf spektra vzorku z vrstvy B3	37
2.15	Graf spektra vzorku z vrstvy B4	37
2.16	Graf spektra vzorku z vrstvy B5	38
2.17	Graf spektra vzorku z vrstvy B6	38
2.18	Náčrt sestavy detektoru, vzorku a bodového zářiče	42
2.19	Aproximační model jednorozměrného zdroje záření	43
2.20	Graf podílů intenzity nepohlcovaného a pohlcovaného záření	45
2.21	Graf aktivity ^{137}Cs na kilogram půdy v závislosti na hloubce pod povrchem	47
2.22	Pokles naměřené aktivity po prostupu fotonů půdou směrem k povrchu	49
2.23	Profil ^{137}Cs v bodě 1	52
2.24	Profil ^{137}Cs v bodě 2	52
2.25	Profil ^{137}Cs v bodě 3	52
2.26	Profil ^{137}Cs v bodě 4	52
2.27	Profil ^{137}Cs v bodě 5	52
2.28	Profil ^{137}Cs v bodě nového měření	52

Seznam tabulek

Číslo	Název	Strana
1.1	Odhadované množství radionuklidů uvolněných při havárii v Černobylu	17
1.2	Celkové množství radionuklidů uvolněných při havárii elektrárny Fukušima I	19
1.3	Výčet hodnot radiačního váhového faktoru pro různé typy záření	21
1.4	Výčet hodnot tkáňových váhových faktorů	21
1.5	Některá lékařská vyšetření, účinky, události a ekvivalentní dávky jim příslušející	21
1.6	Hodnocené radioizotopy cesia	22
2.1	Sebraná množství půdy	28
2.2	Hmotnosti m suchých vzorků v Marinelliho nádobách a jejich hustoty	28
2.3	Radiační pozadí použitých detektorů na čáře vyzařování ^{137}Cs	29
2.4	Naměřená množství registrovaných fotonů R pocházejících z ^{137}Cs ve vzorcích	29
2.5	Čísla kanálů Ch korespondující s energiemi E píků radionuklidů zvolených pro energetickou kalibraci detektoru GC3018	31
2.6	Čísla kanálů Ch korespondující s energiemi E píků pro energetickou kalibraci pozadí detektoru GWD-3023	31
2.7	Vypočtené koeficienty a_1, a_2, a_3 a a_4	32
2.8	Vybrané spektrální čáry identifikované v energetickém spektru vzorků	32
2.9	Základní údaje o etalonu použitém ke kalibraci detektoru GC3018	39
2.10	Výčet radionuklidů přítomných v kalibračním etalonu 200913-1425020	40
2.11	Vybrané radionuklidy v etalonu 200913-1425020	40
2.12	Základní údaje o etalonu použitém ke kalibraci detektoru GWD-3032	40
2.13	Výčet radionuklidů přítomných v kalibračním etalonu 260717-1647024	41
2.14	Vybrané radionuklidy v etalonu 260717-1647024	41
2.15	Naměřená aktivita ^{137}Cs ve vzorcích	42
2.16	Údaje o bodovém zdroji s radionuklidem ^{137}Cs	44
2.17	Hodnoty počtu registrovaných fotonů v soustavách vzorků a bodového zářiče	44
2.18	Výčet hodnot využitých pro výpočet koeficientů q	46
2.19	Výsledné hodnoty aktivity ^{137}Cs	46
2.20	Vypočtené celkové hodnoty aktivity ^{137}Cs v objemu každé vrstvy o obsahu podstav 1 m^2 a tloušťkách vrstev H	48
2.21	Vrstvy půdy v pořadí od nejhlubší po povrchovou s hodnotami aktivity, která by byla zjištěna podle postupu (2.20)	50
2.22	Hodnoty aktivit ^{137}Cs v půdních profilech	51
2.23	Aktivity ^{137}Cs ve vrstvách půdy v bodě č. 2	51
2.24	Povrchová kontaminace ^{137}Cs v bodech měření z počátku června roku 2015	51

Úvod

Vlivem lidské činnosti byla do životního prostředí uvolněna celá řada radionuklidů, ať už v důsledku četných detonací jaderných zbraní, nebo jaderných havárií, z nichž největší dopad měl výbuch reaktoru v Černobylské jaderné elektrárně, který nastal 26. dubna roku 1986. Tato bakalářská práce se zaměřuje na měření aktivity dvou z těchto radionuklidů, a to ^{134}Cs a ^{137}Cs . Většina radionuklidů uvolněných při Černobylské havárii se vyznačuje krátkým poločasem přeměny v řádu dnů, a není je po třech desetiletích možno detekovat, nebo ze životního prostředí již zcela vymizely. Tato práce vyhodnocuje především radioizotop ^{137}Cs s poločasem přeměny 30,07 let a měla by tedy ověřit platnost zákona radioaktivní přeměny, kterým je dán exponenciální pokles aktivity určitého množství radionuklidu v čase. Jelikož od Černobylské havárie uplynulo již přes 30 let, mělo by množství druhého posuzovaného radioizotopu, ^{134}Cs s poločasem přeměny 2,0648 let, být mizivé. Bude-li naměřeno, musí pocházet z jiného zdroje.

Aktivita zmíněných radionuklidů bude měřena z půdních vzorků. Tyto budou nasbírány z několika vrstev, ale jen z jednoho místa. Bohužel se nepodařilo získat výsledky měření provedených v tomto místě v roce 1986. Nově naměřená data budou srovnána s výsledky měření z roku 2015. Tato práce by rovněž měla posoudit, zda a jakým způsobem prosakují radioizotopy cesia půdou v čase. Toho bude docíleno srovnáním nově získaných dat se staršími.

Kapitola 1., Kompendium teorie, nastiňuje fyzikální podstatu radioaktivity a jejích podtypů. Rozlišuje také radionuklidy podle jejich původu, s důrazem na radionuklidy vznikající vlivem působení člověka. Dále je v této kapitole popsán průběh havárií jaderných elektráren v Černobylu a Fukušimě. Kapitola také pojednává o účincích ionizujícího záření na lidské tělo a o výskytu významných zdrojů radiace v životním prostředí.

Kapitola 2., Zpracování měření, popisuje lokalitu sběru zkoumaných vzorků a půdní profil v bodu sběru samotném. Kapitola jedná o metodice měření aktivity ^{134}Cs a ^{137}Cs a o postupu hledání výsledných hodnot. Kapitola klade důraz na důležitost provedení energetické a účinnostní kalibrace při získávání hodnot aktivity zájmových radionuklidů ve vzorcích a jejich následnou korekci kvůli rozdílných hodnotách hustoty hodnocených vzorků.

Kapitola 3., Určení a výpočet nejistot, shrnuje vztahy platné pro nejistoty dílčích a konečných výsledků hodnot.

Kapitola 4., Závěr, shrnuje výsledky měření. Je zde také komentována problematika možnosti ověření zákona radioaktivní přeměny pro hodnocené radionuklidy odebráním vzorků v oblastech se značně nehomogenním rázem zamoření.

1 Kompendium teorie

Jádra prvků periodické tabulky jsou tvořena protony a neutrony. Pozice daného chemického prvku v této tabulce je určena počtem protonů v jeho jádře, tedy protonovým číslem Z . V rámci jednoho prvku se však může uvnitř jádra vyskytovat různý počet neutronů. Tyto odlišné konfigurace nazýváme izotopy. Většina těchto konfigurací však není v čase stabilní a některé chemické prvky nemají žádné stabilní izotopy. Nestabilní izotopy chemických prvků nazýváme radionuklidy. Není-li jádro daného izotopu stabilní, podléhá radioaktivní přeměně. Touto přeměnou vznikají jiná jádra, která mohou být stabilní, nebo rovněž radioaktivní. Souhrně jsou radioaktivní přeměny označovány jako radioaktivita a emitované záření jako radiace [1].

1.1 Radioaktivní přeměny

Nestabilní jádra podléhají samovolné přeměně na jiná jádra a platí, že rychlost poklesu počtu nepřeměněných jader v čase t je přímo úměrná počtu jader N_t . Platí vztah:

$$-\frac{dN_t}{dt} = \lambda N_t, \quad (1.1)$$

kde λ je přeměnová konstanta s jednotkou s^{-1} . Radioaktivní přeměna je náhodný děj. Pro konkrétní jádro není nijak možné určit, kdy dojde k jeho přeměně. Lze zkoumat velký soubor jader a určit tak pravděpodobnost přeměny pro jedno jádro. Po vyřešení diferenciální rovnice (1.1) platí pro počet nepřeměněných jader vztah:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.2)$$

který je znám jako zákon radioaktivní přeměny. Ten udává, kolik jader N_t z počátečního množství N_0 zbude, tedy nepodlehne radioaktivní přeměně, po uplynutí času t .

Často používaným parametrem je takzvaný poločas přeměny T . Ten udává, za jakou dobu dojde k radioaktivní přeměně poloviny jader uvažovaného množství. Poločas přeměny je charakteristický pro všechny existující radionuklidy a najdeme jej následující úpravou vztahu (1.2):

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}. \quad (1.3)$$

Úpravou vztahu (1.3) vyjádříme poločas přeměny jako [1]:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (1.4)$$

Pro hodnocení radioaktivních přeměn je byla zavedena aktivita A , což je veličina, která udává, ke kolika radioaktivním přeměnám dochází v určitém vzorku za jednu sekundu. Jednotkou je Becquerel a značkou této jednotky je Bq [2]. Může být však zavedena podle potřeby jako aktivita na jednotku hmotnosti, objemu, či plochy.

Radioaktivní přeměna probíhá uvolněním části přebytečné energie nestabilního jádra vyzářením nějakého druhu částice, ve většině případů doprovázené také elektromagnetickým zářením o vysoké energii, tedy rentgenovým nebo gama zářením [2]. Podle typu částice uvolněné při přeměně jádra rozlišujeme několik druhů radioaktivních přeměn.

Alfa přeměna

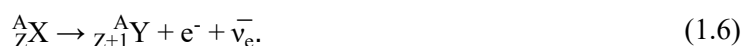
Při alfa přeměně je z nestabilního jádra radionuklidu vyzářeno jádro helia-4, neboli alfa částice. Nukleonové číslo A nově vzniklého nuklidu je nižší o 4, protonové číslo Z pak o 2. Alfa přeměně podléhá například ^{238}U za vzniku ^{234}Th , a to podle vztahu [1]:



Beta přeměna

Při beta přeměně je z nestabilního jádra radionuklidu vyzářena částice beta, což je v závislosti na konkrétním typu přeměny buď elektron, nebo pozitron.

Existují tedy 2 typy beta přeměny. Prvním typem je β^- přeměna, při které v jádře radionuklidu dochází k přeměně jednoho neutronu v proton a k vyzáření elektronu e^- a elektronového antineutrína $\bar{\nu}_e$. Nově vzniklý nuklid má protonové číslo Z nižší o 1. Pro β^- přeměnu platí vztah:

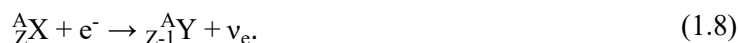


Druhým typem beta přeměny je β^+ přeměna. V jádře radionuklidu dochází k přeměně protonu v neutron a k vyzáření pozitronu e^+ , což je antičástice elektronu, a elektronového neutrina ν_e . Protonové číslo Z nově vzniklého nuklidu je o 1 nižší. Pro β^+ přeměnu platí vztah [1]:



Elektronový záchyt

Elektronový záchyt je pohlcení elektronu z obalu atomu jádrem a následnou přeměnou protonu jádra v neutron. Pro elektronový záchyt platí [2]:



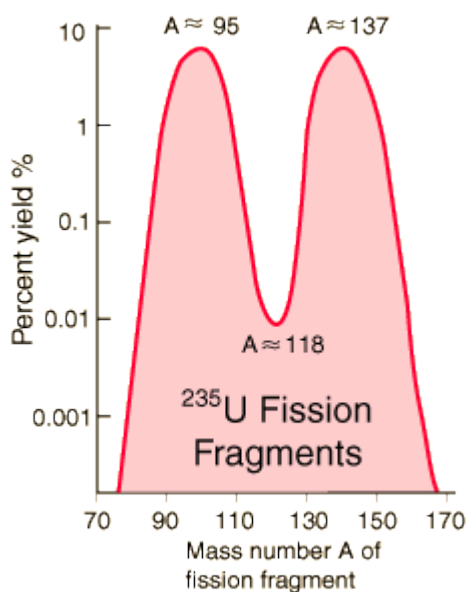
Gama přeměna

Gama přeměna je charakterizována uvolněním přebytečné energie jádra v excitovaném stavu ve formě gama záření [2]. Gama přeměna probíhá podle vztahu:



Štěpení jader

Některé radioizotopy velmi těžkých chemických prvků mohou podléhat samovolnému štěpení jader na dvě nebo více dceřiných jader. Takto vzniká v objemu mateřského prvku celá řada štěpných produktů o různých nukleonových číslech A , některé s nízkou a některé s vysokou pravděpodobností. Příkladem je štěpení ^{235}U podle obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Pravděpodobnost vzniku různých dceřiných jader při štěpení ^{235}U [3]

Dceřiná jádra mají vysokou kinetickou energii, která způsobuje tvorbu tepla ve štěpném materiálu. Rozpadem mateřského jádra se uvolňují i neutrony, které mohou podpořit štěpení dalších jader. Těchto vlastností se využívá v jaderné energetice [2].

1.2 Přirozená radioaktivita

Výskyt radioaktivity v životním prostředí je přirozený. Každé místo na Zemi má své charakteristické radiační pozadí, jehož největší příspěvek je tvořen zářením pocházejícím z radioizotopu radonu ^{222}Rn (Obrázek 1.6). Radon je produkt přeměnové řady uranu podle obrázku 1.2. Jeho koncentrace v daném místě závisí tedy na množství uranu v podložních horninách.

Přirozeně se vyskytující radionuklidy lze rozlišit do kategorií, a to podle jejich původu na Zemi.

1.2.1 Primordiální radionuklidy

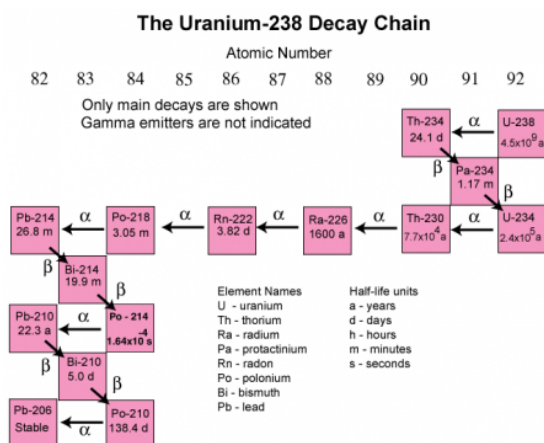
Primordiální nuklidy jsou takové, které jsou na Zemi přítomny už od jejího vzniku. Samotné tyto nuklidy vznikly již při velkém třesku, nebo v pozdějších dobách stelární nukleosyntézou. Většina materiálu na Zemi je tvořena primordiálními nuklidy. Některé z nich jsou radioaktivní a kvůli svému dlouhému poločasu přeměny se na Zemi vyskytují dodnes, například ^{40}K a ^{235}U [4].

Kvůli poločasu přeměny 1,277 miliard let má izotop draslíku ^{40}K využití v určování stáří velmi starých vzorků hornin. Toto je prováděno metodou K-Ar datování, která měří podíl ^{40}K a ^{40}Ar ve zkoumaném vzorku. Argon je za běžných podmínek inertním plynem, takže by neměl být v horninách přítomen, protože by z nich během jejich tvorby a tuhnutí uniknul. Veškerý argon nalezený v horninách musí tedy pocházet z přeměny ^{40}K . S pravděpodobností $P_\gamma = 10,9\%$ probíhá přeměna ^{40}K na ^{40}Ar podle vztahu [5]:

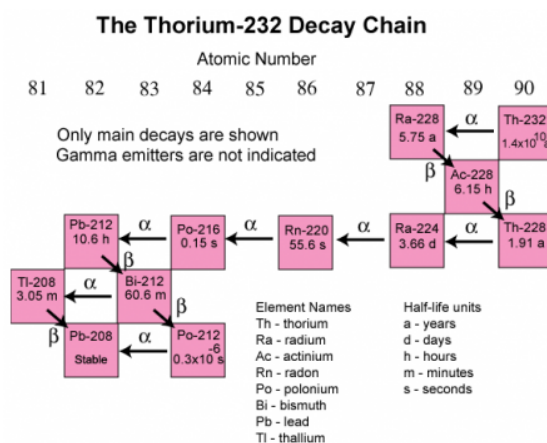


1.2.2 Radionuklidy z přeměnových řad

Tyto radionuklidy, také nazývané radiogenické, jsou produktem přeměny primordiálních, ale i jiných radionuklidů. Přeměna radionuklidů na stabilní finální produkty nemusí probíhat přímo, ale v řetězcích radioaktivních meziproductů podle obrázků 1.2 a 1.3, které znázorňují uran-radiovou a thoriovou přeměnovou řadu. Veškeré přeměnové řady končí na stabilních nuklidech, které další radioaktivní přeměně nepodléhají.



Obrázek 1.2: Uran-radiová přeměnová řada [6]



Obrázek 1.3: Thoriová přeměnová řada [7]

1.2.3 Kosmogenní radionuklidy

Kosmogenní radionuklidy vznikají v důsledku interakce zemské atmosféry či svrchních vrstev půdy s částicemi kosmického záření. Kosmické záření rozlišujeme na primární a sekundární. Primární kosmické záření je tvořeno částicemi přilétajícími z vesmíru, zejména protony, alfa částicemi a volnými elektrony. Jako sekundární kosmické záření označujeme spršku částic vznikajících interakcí primárního kosmického záření se zemskou atmosférou. Jedná se například o neutrony [4].

Významným kosmogenním radionuklidem je uhlík-14. Ten vzniká interakcí sekundárního kosmického záření, konkrétně neutronů, s atomy dusíku-14 podle následujícího vztahu:



${}^{14}\text{C}$ je podobně jako ${}^{40}\text{K}$ využíván k měření stáří zkoumaných vzorků, nejedná se však o horniny. Vzhledem k roli uhlíku v biologii je tato metoda spolehlivým nástrojem určování stáří ostatků organismů, které nový ${}^{14}\text{C}$ z prostředí nepřijímají, na rozdíl od organismů žijících. S poločasem přeměny 5730 let je však tzv. radiokarbonová metoda datování vhodná jen pro historicky mladé vzorky do stáří nejvýše 60 000 let [8].

1.3 Antropogenní radioaktivita

Radioaktivní izotopy se do životního prostředí uvolňují i v důsledku činnosti člověka. Tyto jsou označovány jako antropogenní radionuklidy. Jedná se například o přísně regulovaná stopová množství radionuklidů uvolňovaná z jaderných reaktorů [7]. Významnějšími zdroji antropogenní radiace v životním prostředí jsou však radionuklidy uvolněné v důsledku jaderných havárií či detonací jaderných zbraní.

1.3.1 Jaderné zbraně

Četné testy jaderných zbraní ve dvacátém století vedly ke zdvojnásobení množství uhlíku-14 v atmosféře [9]. Tento nárůst nastal důsledkem interakce atmosférického dusíku s neutrony emitovanými při jaderných výbuších podle vztahu (1.11).

Spad z jaderných zbraní je tvořen štěpnými produkty použitého paliva. Mezi tyto produkty patří i radionuklid ${}^{137}\text{Cs}$, který je nazýván radiocesium. S poločasem přeměny 30,07 let je ${}^{137}\text{Cs}$ stále přítomno v životním prostředí i mnoho desetiletí od konce období zkoušek jaderných zbraní. Většina testů jaderných zbraní proběhla na severní polokouli. Kvůli špatné mísivosti atmosféry severní a jižní polokoule byla severní polokoule zamořena více. Hodnoty počátečního zamoření ${}^{137}\text{Cs}$ z jaderných zbraní závisí na zeměpisné šířce a pohybují se mezi 160 a 3200 Bq·m⁻². Hodnoty kontaminace pro jižní polokouli nepřesahují několik set Bq·m⁻². Na severní polokouli se tyto hodnoty pohybují mezi 1000 a 3200 Bq·m⁻². Jaderné výbuchy vynesly štěpné produkty až do stratosféry, odkud se postupně snášely k povrchu Země rozptýlené na větším území. V případě havárií jaderných elektráren

v Černobyli a Fukušimě se radionuklidy dostaly jen do troposféry a k jejich spadu došlo v kratší době, což mělo za následek zamoření oblastí menší rozlohy, ale s lokálně vyššími hodnotami kontaminace [10].

1.3.2 Havárie v Černobylské jaderné elektrárně

25. dubna 1986 bylo kvůli plánované opravě čtvrtého bloku reaktoru jaderné elektrárny v Černobyli zahájeno jeho odstavení. Před odstavením byl zahájen experiment, který měl ověřit schopnost turbogenerátoru napájet po dobu přibližně 40 sekund čerpadla havarijního chlazení po uzavření přívodu páry do turbíny, a to v režimu setrvačného doběhu.

Experiment měl proběhnout snížením výkonu reaktoru na 25 až 30 %, tedy tepelný výkon 700 až 1000 MW, což je pro daný typ reaktoru v oblasti nejnižších povolených hodnot. Dále mělo proběhnout odstavení první ze dvou turbín připojených k reaktoru a odpojení systému havarijního chlazení, aby se nespustil během experimentu. Poté měl být přerušen přívod páry ke druhé turbíně, což měl zároveň být signál pro systém havarijní ochrany k automatickému odstavení reaktoru. Experiment neřídili specialisté na provozní režimy a jadernou bezpečnost, ale elektrotechnici.

Ve 13:05 byl výkon reaktoru snížen na polovinu a systém havarijního chlazení byl odpojen. Další snižování výkonu bylo pozastaveno na 9 hodin a v experimentu pokračovala další směna, která na něj nebyla připravena.

Od času 23:10 snižování výkonu reaktoru pokračovalo, ale kvůli chybě operátora tento výkon prudce poklesl na 30 MW a téměř zastavil štěpnou reakci. Při tak nízké hodnotě prudce rostla koncentrace ^{135}Xe , který má vysokou schopnost pohlcování neutronů. Nastala tzv. xenonová otrava reaktoru a jeho opětovné spuštění by bylo možné po dostatečném snížení koncentrace tohoto radionuklidu, který má poločas přeměny 9,14 hodin. Operátoři měli podle předpisů ukončit prováděný experiment a reaktor poprvé odstavit. Reaktor se totiž dostal do nestabilního stavu, proti kterému systém regulace výkonu zasáhl vytahováním grafitových regulačních tyčí. Výkon reaktoru se stabilizoval na 200 MW. Hladina vody a tlak v separátorech poklesl kvůli sníženému vývoji páry. Systém havarijní ochrany byl zablokovan operátorem a automatické odstavení reaktoru, ke kterému by za běžných okolností došlo, nenastalo.

26. dubna v 01:22 operátoři zjistili, že regulačních tyčí v aktivní zóně bylo méně, než byla polovina povoleného počtu. Reaktor měl být bezodkladně odstaven podruhé, experiment ale pokračoval. Operátor ve snaze zajištění dostatečného chlazení aktivní zóny reaktoru i po ukončení experimentu spustil dvě záložní čerpadla k šesti pracujícím. Zesílené chlazení reaktoru způsobilo snížení množství páry v chladiči aktivní zóny a další pokles reaktivity. Systém regulace výkonu zareagoval vytažením dalších regulačních tyčí.

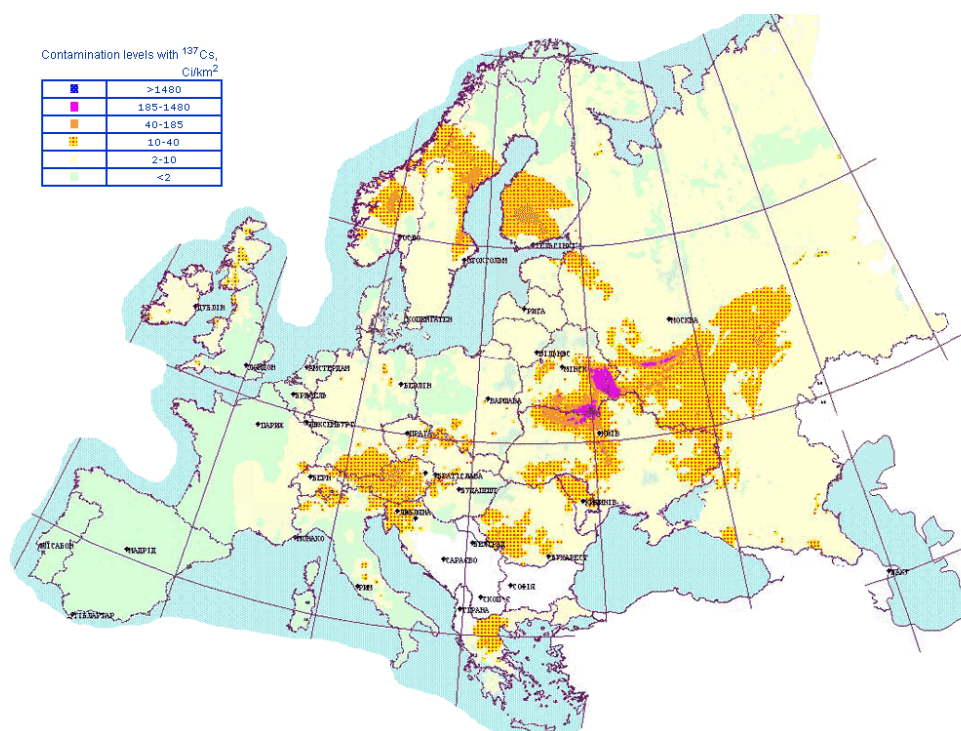
V 01:23 operátoři zablokovali havarijní signál, který by reaktor odstavil po uzavření přívodu páry na turbínu. Chtěli tak zajistit možnost opakování experimentu, v případě jeho neúspěchu. Experiment začal uzavřením ventilu turbogenerátoru. Reaktor pracoval s výkonem 200 MW. Snížení výkonu cirkulačních čerpadel způsobilo snížení průtoku vody reaktorem, vzrostla tak její teplota a tlak. To spolu s nestabilním stavem reaktoru zvýšilo vývin páry, reaktivitu a výkon reaktoru. Systém regulace

výkonu zareagoval zasunutím absorpčních tyčí. Poté výkon reaktoru nekontrolovatelně rostl, voda začala vařit a došlo k přehřátí jaderného paliva. Operátoři spustili havarijní odstavení reaktoru zasunutím regulačních tyčí, což však katastrofě už nezabránilo.

V 01:24 nastala v důsledku vzrůstu teploty k porušení palivových článků a prudké reakci vody s horkým jaderným palivem exploze páry, která zvedla betonový kryt reaktoru vážící 1000 tun. O dvě až tři sekundy později nastala druhá exploze, není však jasné, co přesně tuto explozi způsobilo. Mohla nastat důsledkem tvorby vodíku reakcí vodní páry se zirkoniem a jeho následnou reakcí se vzdušným kyslíkem, nebo důsledkem druhého nárůstu výkonu. Exploze vyvrhly část aktivní zóny reaktoru, tedy jaderného paliva a grafitu, mimo reaktor.

Při požáru reaktoru hořel grafit při teplotě 5000 °C. Teplota samotného jaderného paliva podle sovětských odhadů nepřesáhla 2000 °C. Do atmosféry se uvolňovalo obrovské množství štěpných produktů, čemuž bylo po deseti dnech zamezeno postupným zasypáním reaktoru celkem 5000 tunami dolomitu, písku, zeminy, olova a sloučenin bóru, což probíhalo z vrtulníků [12].

Uvolněné radionuklidy, jejichž celková množství jsou uvedena v tabulce 1.1, byly vlivem proudění vzduchu rozneseny po celé Evropě. Nejzávažněji byla kontaminována půda v Bělorusku a na Ukrajině. Množství radioaktivního spadu na určitém místě silně záviselo na intenzitě dešťových srážek v průběhu šíření uvolněného radioaktivního oblaku. Na obrázku 1.4 je mapa evropy znázorňující úrovně zamoření povrchu radionuklidem ^{137}Cs .



Obrázek 1.4: Mapa kontaminace Evropy spadem ^{137}Cs k roku 1992. Oprava: Správná jednotka plošné kontaminace je $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ [11].

V oblastech kontaminovaných méně než $37 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ radionuklidu ^{137}Cs nejsou uplatňována žádná ochranná opatření. Pro oblasti s kontaminací do $555 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ byla zavedena pravidelná kontrola obsahu radionuklidů v potravinách. Území s plošnou kontaminací ^{137}Cs od 555 do $1480 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ jsou alespoň z části, nebo úplně, zásobovány nekontaminovanými potravinami. Z oblastí zamořených více než $1480 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ bylo obyvatelstvo vysídleno jinam [12].

Aby bylo zabráněno dalšímu uvolňování radiace z trosk reaktoru do okolí, byla v listopadu 1986 dokončena stavba ochranného sarkofágu z $400\,000 \text{ m}^3$ betonu a kovové kostry vážící 7300 tun. Tento projekt začal již tři týdny po havárii. Jelikož byla tato stavba považovaná za provizorní krizové řešení, odhadovali sovětské vědci její životnost na 20 až let. Poté by vyžadovala rekonstrukční práce.

V roce 2006 byla ocelová stabilizační struktura rozšířena tak, aby lépe podporovala poškozenou střechu sarkofágu. V roce 2010 bylo zjištěno, že střechou sarkofágu prosakovala do reaktoru voda, která se po následné kontaminaci dostávala do podložní půdy.

12. února 2013 se zhroutilo 600 m^2 střechy budovy přiléhající k sarkofágu. Nejprve bylo usouzeno, že se střecha zhroutila pod vahou nahromaděného sněhu. Množství sněhu však nebylo velké a kolaps střechy byl poté přisuzován stáří budovy a špatně provedeným předchozím opravám [13].

29. listopadu 2016 byla dokončena stavba nového sarkofágu o délce 162 m , rozpětí 257 m , výšce 108 m a celkové hmotnosti $36\,000$ tun. Tento sarkofág byl navržen tak, aby bylo zabráněno úniku prachu a jiných radioaktivních částic z reaktoru a bezprostředního okolí. S životností 100 let bude navíc umožněno rozebrání stárnoucího sarkofágu z roku 1986 [14].

Tabulka 1.1: Odhadované množství radionuklidů uvolněných při havárii v Černobylu [7]

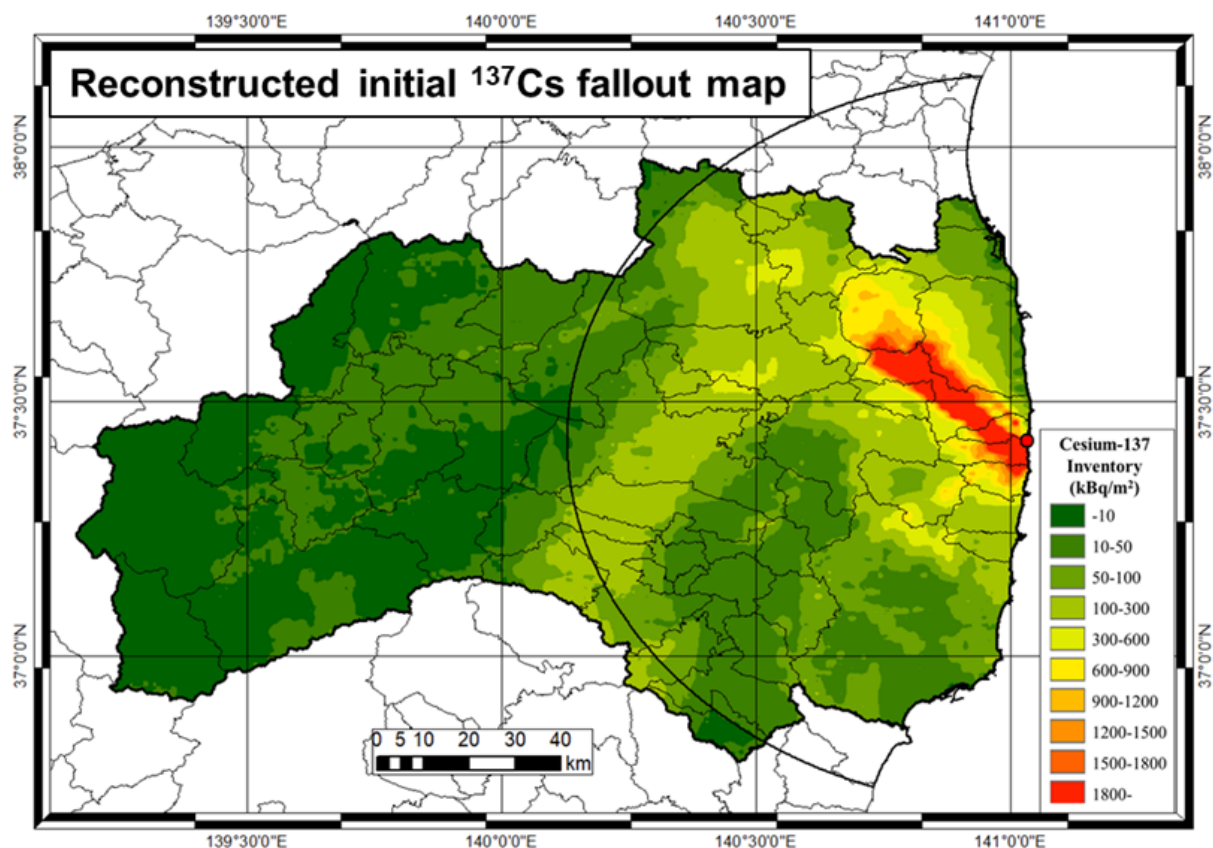
Radionuklid	A [PBq] (1986)	T
^{85}Kr	33	10,756 a
^{133}Xe	6500	5,243 d
^{132}Te	1150	3,204 d
^{131}I	1760	8,020 7 d
^{134}Cs	54	2,064 8 a
^{137}Cs	85	30,07 a
^{89}Sr	115	50,53 d
^{90}Sr	10	28,79 a
^{103}Ru	>168	39,26 d
^{106}Ru	>73	373,59 d
^{140}Ba	240	12,752 d
^{95}Zr	196	64,02 d
^{99}Mo	>168	65,94 h
^{141}Ce	196	32,501 d
^{144}Ce	116	284,893 d
^{239}Np	945	2,356 5 d
^{238}Pu	0,035	87,7 a
^{239}Pu	0,03	24110 a
^{240}Pu	0,042	6563 a
^{241}Pu	6	14,35 a
^{242}Cm	0,9	162,8 d

1.3.3 Havárie elektrárny Fukušima I

11. března 2011 došlo v blízkosti pobřeží Japonska k podmořskému zemětřesení o síle 9 stupňů Richterovy stupnice. Toto zemětřesení vytvořilo vlnu tsunami. V oblasti postižené zemětřesením se nacházejí čtyři jaderné elektrárny, které byly při zemětřesení automaticky odstaveny. Situaci v elektrárnách Onagawa, Tokai a Fukušima II se podařilo brzy dostat pod kontrolu.

Bloky 4,5 a 6 elektrárny Fukušima I byly v době zemětřesení v režimu plánované odstávky. Bloky 1, 2 a 3 byly odstaveny a spustily se generátory havarijního chlazení reaktorů, aby nedošlo k jejich přehřátí. 41 minut po zemětřesení dorazily 8 minut po sobě dvě vlny tsunami o výšce 14 až 15 metrů, které smetly systémy havarijního chlazení, a to včetně jejich generátorů. Chlazení bylo poté zajišťováno náhradními systémy a jediným zdrojem elektrické energie byly baterie s výdrží několik hodin.

Mezi 12. a 15. březnem došlo v důsledku selhání chlazení a následného tavení jaderného paliva a k reakci zirkonia s vodní párou za vzniku vodíku, který způsobil celkem tři exploze. Exploze na třetím bloku 14. března zničila střechu budovy a odkryla bazén s vyhořelým jaderným palivem. Bylo uvolněno značné množství radionuklidů uvedených v tabulce 1.2. Obrázek 1.5 ukazuje mapu nejvíce kontaminované části Japonska. Chlazení bylo následně zajišťováno helikoptéry a vodními děly [16].



Obrázek 1.5: Zamoření nejvíce zasažené části Japonska ^{137}Cs po úniku radiace z Fukušimy I [15]

Od 25. března byly reaktory 1., 2. a 3. bloku chlazeny sladkou vodou s kyselinou boritou, aby bylo zabráněno obnovení kritičnosti reaktorů.

Mezi 2. a 6. dubnem došlo k úniku 4,7 PBq radionuklidů trhlinou ve stěně betonové šachty turbínové haly v blízkosti 2. bloku. Únik byl zastaven použitím polymerního vodního skla. Ze stejné turbínové haly muselo být 19. dubna zahájeno odčerpávání vysoce radioaktivní vody.

Stabilizace jaderné elektrárny probíhala během následujících měsíců. 16. prosince bylo dosaženo stavu studeného odstavení, tedy snížení teploty chladiva pod 100 °C a snížení ozáření obyvatelstva s cílem udržet hodnoty pod limitem 1 mSv za rok [16].

Větší část radiace uvolněné z elektrárny Fukušima I směřovala nad oceán a do něj, kde došlo k jejímu zředění a nepředstavuje riziko ohrožení populace dále než několik desítek kilometrů od elektrárny. Dávky, jaké jsou dnes měřeny v blízkém okolí japonské elektrárny byly naměřeny stovky kilometrů od elektrárny v Černobylu [17].

Koncem března roku 2011 bylo v Polsku naměřeno 5-6 mBq·m⁻³ ¹³¹I a méně než 1 mBq·m⁻³ ¹³⁷Cs ve vzduchu. Za běžné situace se tyto hodnoty pohybují pod hodnotou 1 μBq·m⁻³. Maximální koncentrace těchto radionuklidů v době havárie v Černobylu byly 1000 až 10 000 krát vyšší [18].

Tabulka 1.2: Celkové množství radionuklidů uvolněných při havárii elektrárny Fukušima I [19], kde čtvrtý sloupec vyjadřuje poměr mezi množstvím uvolněných radionuklidů z Černobylu a Fukušimy.

Radionuklid	<i>A</i> [PBq]	<i>T</i>	Poměr aktivit
¹³³ Xe	11 000	5,243 d	0,59
¹³¹ I	160	8,020 7 d	11
¹³⁴ Cs	18	2,064 8 a	3,0
¹³⁷ Cs	15	30,07 a	5,7
⁹⁰ Sr	0,14	28,79 a	72
²³⁸ Pu	1,9·10 ⁻⁵	87,7 a	1800
²³⁹ Pu	3,2·10 ⁻⁶	24110 a	9400
²⁴⁰ Pu	3,2·10 ⁻⁶	6563 a	13 000

1.4 Vliv radioaktivity na člověka a životní prostředí

Z hlediska fyziky dochází při ozáření hmoty radiací k excitaci a ionizaci. Při tomto procesu je hmotou absorbována energie.

Z biologického hlediska může záření škodit organismu dvěma způsoby. Živá buňka může být zářením usmrcena v jakékoliv fázi svého života. Nejcitlivější je však ve fázi buněčného dělení. Poškození zářením se projev tak, že buňka ztratí schopnost se dělit. Nastane takzvaná mitotická smrt buňky. Dávka záření postačující pro usmrcení buňky ve fázi mitózy je malá. Naproti tomu dávka, která by byla potřebná pro buněčnou smrt mimo mitózu je vysoká a musela by způsobit úplnou denaturaci buňky. Ionizující záření je tedy nejnebezpečnější pro buňky, které se rychle a často dělí, tedy krvetvorné orgány, vyvíjející se plod nebo výstelka střeva.

Druhý způsob, jak ionizující záření může škodit živým organismům, je mutagenita. Záření může poškodit nebo změnit genetickou informaci uloženou v chromozomech. Takto zvyšuje ionizující záření šanci tvorby rakoviny

Účinky radiace na organismus je možno dělit na deterministické a stochastické. K deterministickým účinkům dochází vlivem smrti části ozářené populace buněk a jedná se například o akutní nemoc z ozáření nebo radiační zánět kůže. Tyto účinky se projevují od určité prahové dávky.

Stochastické účinky, také označované jako pravděpodobnostní, se projevují v důsledku mutagenity ionizujícího záření. Mezi tyto účinky patří genetické mutace a vznik zhoubných nádorů. Velikost dávky nemá vliv na závažnost následků. S rostoucí dávkou ale roste pravděpodobnost jejich projevení [20].

Hodnocení ozáření

Ozáření lze vyjádřit jako dávku:

$$D = \frac{E}{m}, \quad (1.12)$$

tedy množství energie přijaté kilogramem hmoty. Jednotkou je $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, nebo také Gy (Gray). Vzhledem k různým úrovním citlivosti živých tkání na ionizující záření byla zavedena ekvivalentní dávka:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}, \quad (1.13)$$

kde w_R je radiační váhový faktor závisející na typu ionizujícího záření (Tabulka 1.3) a $D_{T,R}$ je dávka radiace absorbována orgánem nebo tkání. Jednotkou ekvivalentní dávky je také $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, ale používá se Sv (Sievert). Celková ekvivalentní dávka přes různé typy záření vznikne součtem:

$$H_T = \sum_R H_{T,R}. \quad (1.14)$$

Pro zhodnocení ozáření celého lidského těla byla zavedena efektivní dávka:

$$E = \sum_T w_T H_T, \quad (1.15)$$

jako součet ekvivalentních dávek v orgánech nebo tkáních, kde w_T je tkáňový váhový faktor (Tabulka 1.4) [21].

V tabulce 1.5 je uveden výčet typických hodnot ekvivalentních dávek, kterým je vystaven člověk během lékařských vyšetření, v důsledku jaderné havárie v Černobyli po evakuaci z bezprostředně zasažené oblasti a hodnoty ekvivalentní dávky, které vedou k závažným zdravotním následkům, případně ke smrti.

Obrázek 1.6 srovnává ekvivalentní dávky obdržené z oblastí zasažených spadem z Černobyli, lékařská vyšetření a průměr evropského radiačního pozadí.

Tabulka 1.3: Výčet hodnot radiačního váhového faktoru pro různé typy záření [22]

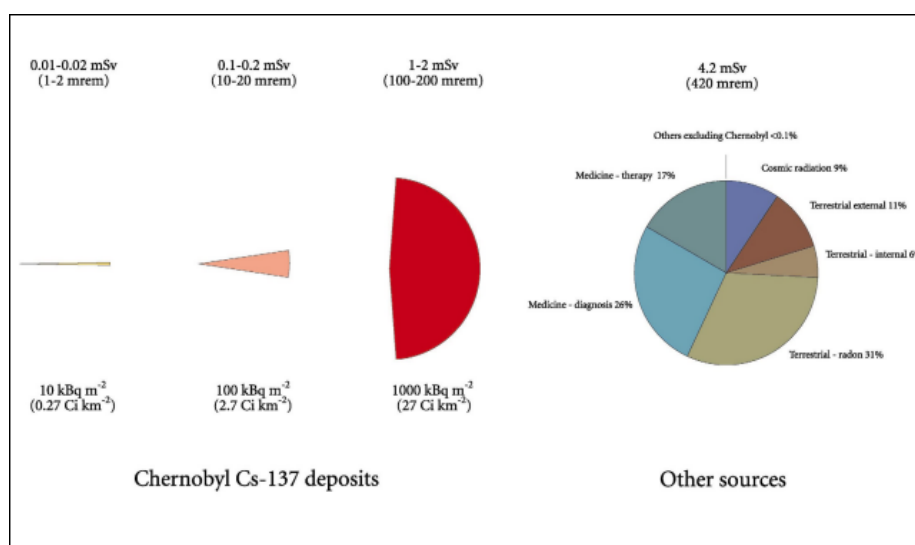
Záření	w_R
rentgenové, gama	1
beta	1
neutrony	5-20
alfa	20

Tabulka 1.4: Výčet hodnot tkáňových váhových faktorů [22]

Tkáň, orgán	w_T
kůže, povrch kostí	0,01
játra, štítná žláza, mléčná žláza	0,05
pľíce, kostní dřeň, tlusté střevo, žaludek	0,12
gonády	0,20

Tabulka 1.5: Některá lékařská vyšetření, účinky, události a ekvivalentní dávky jim příslušející [23]

E [mSv]	Událost
0,01	Rentgenový snímek chrupu
0,1	Rentgenový snímek hrudi
1,5	Rentgenový snímek páteře
10	CT vyšetření celého těla
100	Nejnižší roční dávka prokazatelně zvyšující riziko rakoviny
350	Dávka, kterou obdrželi obyvatelé Černobylu, kteří byli v roce 1986 evakuováni
1000	Kumulativní dávka s 5% šancí způsobení smrtící rakoviny roky po ozáření
5000	Jednorázová dávka s 50% úmrtností
10000	Jednorázová dávka smrtelná do několika týdnů



Obrázek 1.6: Porovnání ročních dávek radiace na jednu osobu v roce 1998 podle zdroje ozáření.

Hodnoty kontaminace v $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ pro ^{137}Cs uvedené v obrázku 1.6 jsou platné k roku 1986. Úrovně dávek v mSv nebo mrem jsou udány pro rok 1998. Kruhový diagram vpravo představuje průměrné hodnoty ozáření ostatními zdroji v Evropě a zahrnuje po směru hodinových ručiček kosmické záření, pozemské vnější ozáření, pozemské vnitřní ozáření, ozáření radonem, lékařská vyšetření, lékařské zákroky a méně než 0,1 % představují jiné zdroje krom spadu z havárie Černobylské jaderné elektrárny. Úrovně dávek radiace z ^{137}Cs jsou založeny na předpokladu nevyužívání ochranných opatření, například kontroly potravin [24].

Radon

Izotop radonu ^{222}Rn vzniká jako produkt přeměny radia ^{226}Ra uran-radiové řady podle obrázku 1.3. Jedná se o radioaktivní plyn, který se může hromadit v obytných budovách. Samotný radon může být vydechnut, ale veškeré následující radionuklidy uran-radiové řady jsou pevné látky a v plicích se usazují. Tyto radioaktivní produkty poté ozařují plicní tkáň zevnitř a poškozují její buňky, což je častou příčinou rakoviny plic. Průměrná objemová aktivita radonu v českých bytech je $118 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, což je jedna z nejvyšších světových hodnot. Hodnoty vyšší než $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ má v České republice až 3 % bytů a pobyt v nich je srovnatelný s obdržením jednoho rentgenového snímku plic každý den [25]. V roce 2008 zemřelo v České republice 5402 lidí na rakovinu plic. 800 až 900 úmrtí na následky rakoviny plic je přisuzováno radonu [26].

Radioaktivní jód

Značné množství radioizotopu ^{131}I bylo uvolněno během testů jaderných zbraní ve dvacátém století a havárií jaderných elektráren v Černobylu a v prefektuře Fukušima. Kvůli relativně krátkému poločasu přeměny 8,0207 dní již nemůže být tehdy uvolněný radioaktivní jód detekován.

Nebezpečí ^{131}I spočívá ve schopnosti štítné žlázy absorbovat jód, což zvyšuje riziko rakoviny štítné žlázy. Největší dávku ^{131}I obdrželi lidé z mléka od krav, které se pásly v zamořených oblastech [27].

Cesium

Radioizotopy cesia na Zemi vznikly nebo vznikají jako produkty štěpných jaderných reakcí. Přirozeně však takové reakce probíhají jen velmi vzácně. Většina radioaktivního cesia má tedy původ v činnostech člověka. Radioizotopy cesia hodnocené v této práci jsou uvedeny v tabulce 1.6.

Tabulka 1.6: Hodnocené radioizotopy cesia [29]

Radionuklid	T [a]	T [d]	E [keV]	P_γ [%]
^{134}Cs	2,064 8	753,652	604,721 0(20)	97,620(30)
			795,864 0(40)	85,530(40)
^{137}Cs	30,07	10 975,55	661,657 0(30)	85,10(20)

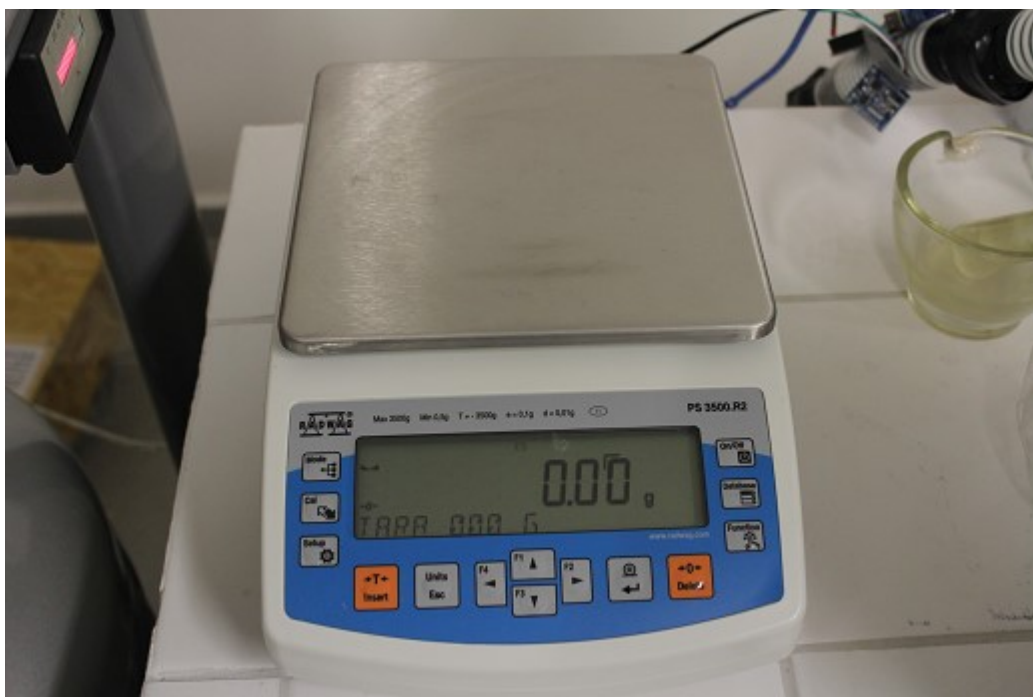
Antropogenní radioizotopy cesia jsou přítomny ve sloučeninách CsI , CsOH a Cs_2CO_3 , které jsou rozpustné ve vodě. V cesiem kontaminovaných půdách tato voda vyživuje rostliny. Ty jsou následně konzumovány zvířaty nebo kultivovány člověkem [7]. Prostupnost cesia půdou je silně závislá na typu půdy, obecně je ale nízká. Rostliny vstřebávající cesium jej po svém uhynutí vrací do koloběhu biologických procesů. Takto je recyklováno ve svrchních partiích profilu půdy. V zemědělsky využívané půdě je jeho koncentrace do hloubky orby homogenizovaná [10].

2 Zpracování měření

Tato kapitola diskutuje postup měření aktivity radioizotopů cesia ^{134}Cs a ^{137}Cs ve vzorcích půdy. Detekční přístroje poskytnuté k vyhodnocení vzorků je možné použít pouze pro spektrometrii gama záření. Nebude tedy možné zkoumat aktivitu například radionuklidu ^{90}Sr , který by s poločasem přeměny 28,79 let měl v prostředí být stále hojně zastoupen, ale jedná se o čistý beta zářič [28]. Hodnoty veličin poločas přeměny T , energie čar E a pravděpodobnost vyzařování P_γ na dané čáře byly pro všechny zmíněné radionuklidy získány z webu <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/> [29].

2.1 Měřicí přístroje

K provedení měření bylo využito několik měřících prostředků. V průběhu shromažďování vzorků byly hloubky půdních vrstev měřeny pásmovým metrem. Jejich hmotnost byla zjištěna váhami PS.3500.R2 od firmy Radwag Balances and Scales. Kvůli limitu 3,5 kg musely být některé půdní vzorky zváženy po částech. Pro potřeby samotného hodnocení aktivity radionuklidů byly vzorky umístěny do Marinelliho nádob. Tyto nádoby o dané geometrii slouží k měření nízcce radioaktivních vzorků, jako je například půda a rozemleté vzorky hornin. Spolehlivých výsledků měření je dosahováno srovnáváním výsledků měření vzorků s výsledky měření kalibračních etalonů, které mají stejnou geometrii.



Obrázek 2.1: Laboratorní váhy použité pro zvážení všech nasbíraných vzorků

K měření aktivity radionuklidů ve vzorcích byl využit HPGe (High Purity Germanium) detektor GC3018 od firmy Canberra Detector Products, dnes Mirion Technologies. Tento detektor využívá germania o vysoké čistotě. Detektor i s měřeným vzorkem byl od radiačního pozadí laboratoře ukryt ve stínění z olověných cihel. K měření byl také využit detektor GWD-3023 od Baltic Scientific Instruments. Tento detektor rovněž využívá vysoce čistého germania a sám je uložen v olověném stínění o velmi nízkém radiačním pozadí. Fotografie obou detektorů jsou na obrázku 2.2. Rozdíl mezi pozadími obou detektorů je patrný z grafů 2.2 a 2.3.

Germaniové detektory jsou polovodičové PIN diody, u kterých je region I citlivý na ionizující záření, specificky na rentgenové a gama záření. Důsledkem interakce fotonů s detektorem vznikají nosiče náboje (díry a elektrony), které jsou elektrickým polem hnány k P a N elektrodám. Tento náboj, úměrný energii předané detektoru interagujícím fotonem, je převeden na napěťový pulz pomocí předzesilovače citlivého na náboj. Protože germanium má úzký zakázaný pás, musí detektory z něj zhotovené být chlazené, aby se tvorba nosičů náboje vlivem tepla redukovala na přijatelnou úroveň. Bez chlazení by kvůli svodovému proudu docházelo k nárůstu šumu, který by snížil energetické rozlišení detektoru. Běžně využívaným chladicím médiem je tekutý dusík o teplotě 77 K [30].



Obrázek 2.2: Fotografie detektorů GC3018 a GWD-3023

2.2 Půdní profil

Vzorky půdy byly nasbírány dne 12. listopadu 2019 z lokality v blízkosti obce Bohuňov v Kraji Vysočina v nadmořské výšce 600 m na souřadnicích 49°33'36" N, 16°10'52" E [31]. Oblast sběru se nachází ve smrkovém lese s odhadovanou vzdáleností mezi stromy 5 m. V průběhu sběru slabě mrholilo.

Sběr byl proveden na jednom místě vyznačeném na mapě v obrázku 2.3. Byl vyměřen čtverec o straně 35 cm a v tomto čtverci probíhalo odhrabování jednotlivých vrstev. Vykopaná jáma měla po ukončení sběru tvar obráceného komolého jehlanu s horní podstavou o hraně 35 cm a spodní podstavou o hraně 20 cm. Pro názornost byl půdní profil na obrázku 2.4 načrtnut jako kvádřovitý.



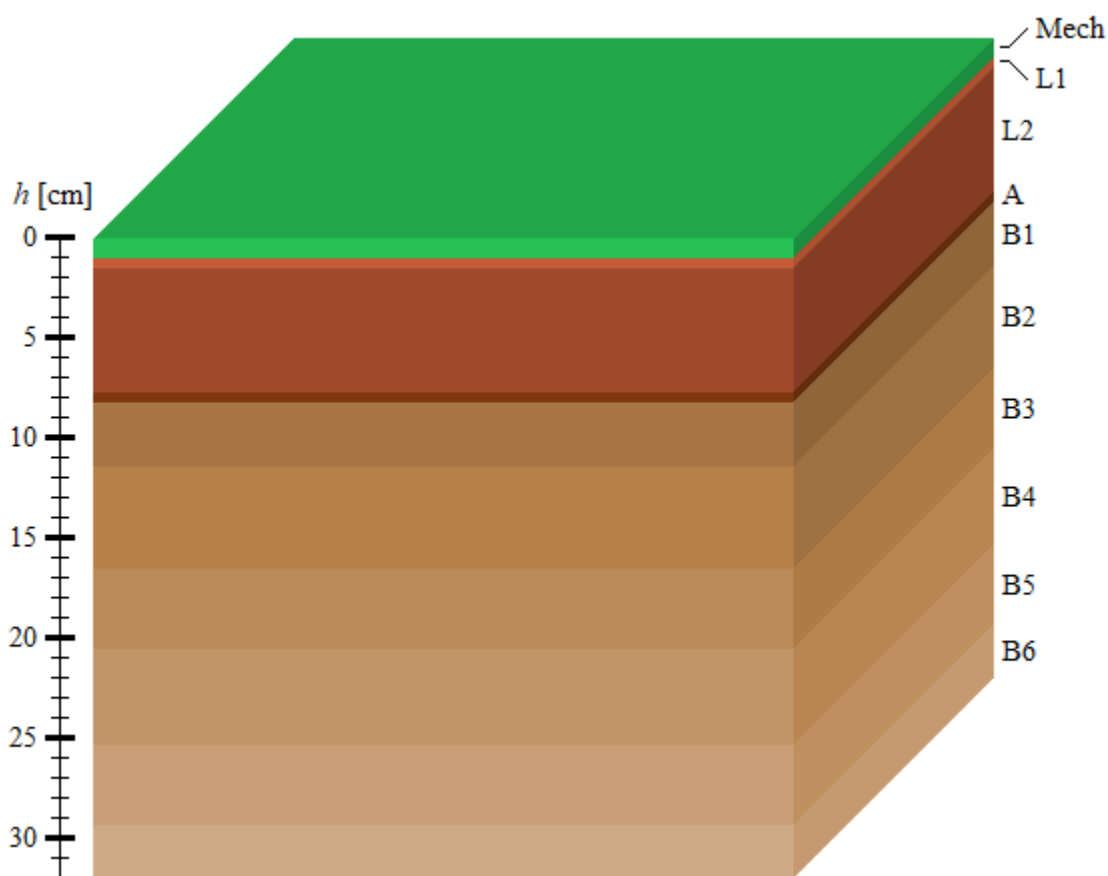
Obrázek 2.3: Mapa lesa, kde na místě označeném červenou kružnicí proběhl sběr vzorků [32].

Povrch půdy v místě sběru byl pokryt mechovým porostem, který byl odebrán jako vzorek a očištěn od jehličí. Bezprostředně pod mechem se nacházela tenká vrstva spadaného suchého jehličí označena jako L1. Jehličí se ve sbírané půdě nacházelo i v další vrstvě, značené L2, a to až do průměrné hloubky přibližně 8 cm. Níže se nacházela tenká vrstva A tmavé humusové půdy. Pod ní následovala už jen těžká zemina světle hnědé barvy, která byla z místa odebrána v šesti vrstvách B1 až B6, ve kterých s hloubkou rostlo množství kamenné drti. Odběr zeminy byl ukončen v hloubce 32 cm. V odebrané výšce půdy se nacházely až 2 cm široké kořeny okolních stromů, které byly ze vzorků odebrány na místě. Vzorky byly uschovány do plastových sáčků nebo tašek.

Nasbírané vzorky byly zváženy čerstvé a před měřením obsahu radioaktivního cesia zbaveny vody vysušením v peci o teplotě přibližně 105 °C po dobu cca 12 hodin. Měřena byla také hmotnost těchto suchých vzorků. Následně proběhlo vytrídění nerozmnělných příměsí, jako byly kameny a zbytky

roślin. Rozměňování proběhlo ručně. Velikost zrn ve vzorcích poté nepřesahovala 5 mm. Tabulka 2.1 udává hodnoty hustoty a hmotnosti vzorků a hloubky vrstev, ze kterých tyto vzorky pochází.

Hodnocení aktivity radioizotopů cesia bylo provedeno ve vzorcích, jejichž objem byl v porovnání s celkovým množstvím nasbírané hmoty každé vrstvy malý. Tyto vzorky byly umístěny do Marinelliho nádob a opětovně zváženy. Následně proběhlo měření počtu registrovaných fotonů R v těchto preparátech. Pro hodnocení vzorků z vrstev A a B6 byl použit detektor GWD-3023, tyto vzorky byly umístěny v nádobách o objemu 700 cm³. Ostatní vzorky byly měřeny pomocí detektoru GC3018 a v nádobách o objemu 450 cm³.



Obrázek 2.4: Náčrt půdního profilu

Tabulka 2.1: Sebraná množství půdy, kde h' představuje hloubku spodní hranice dané vrstvy pod povrchem. Hodnoty h jsou pak hloubky středu každé vrstvy. Veličiny m_{ε} a m_s představují hmotnosti čerstvých, resp. vysušených vzorků. Hodnoty hustoty jsou značeny ekvivalentně.

Vrstva	h' [cm]	h [cm]	m_{ε} [g]	m_s [g]	ρ_{ε} [kg·m ⁻³]	ρ_s [kg·m ⁻³]
Mech	1,00	0,50	420,96	96,92	709,3(71)	163,3(17)
L1	1,50	1,25	439,17	116,42	797,0(80)	211,3(22)
L2	7,67	4,58	3261,45	1805,20	1160(12)	642,2(65)
A	8,17	7,92	875,93	548,88	1227(27)	769(17)
B1	11,4	9,78	2178,74	1524,11	1316(14)	920,4(92)
B2	16,5	13,9	4205,76	3193,84	1367(14)	1038(11)
B3	20,5	18,5	3766,94	2971,96	1465(15)	1156(12)
B4	25,3	22,9	2497,56	2029,97	1376(14)	1118(12)
B5	29,3	27,3	1602,04	1333,47	1471(15)	1224(13)
B6	32,0	30,6	1664,93	1406,49	1607(35)	1357(29)

Z objemu V Marinelliho nádob v tabulce 2.2, ve kterých byly suché vzorky o hmotnosti m umístěny, byly hodnoty hustoty ρ_s vypočteny podle vztahu:

$$\rho_s = 1000 \frac{m}{V}. \quad (2.1)$$

Hustoty čerstvých vzorků byly poté určeny podle:

$$\rho_{\varepsilon} = \frac{m_{\varepsilon}}{m_s} \rho_s. \quad (2.2)$$

Tabulka 2.2: Hmotnosti m suchých vzorků v Marinelliho nádobách a jejich hustoty

Vrstva	m [g]	V [cm ³]	ρ_s [kg·m ⁻³]
Mech	73,49	450,0(45)	163,3(17)
L1	95,07	450,0(45)	211,3(22)
L2	288,99	450,0(45)	642,2(65)
A	538,11	700(15)	769(17)
B1	414,18	450,0(45)	920,4(92)
B2	467,13	450,0(45)	1038(11)
B3	520,20	450,0(45)	1156(12)
B4	503,28	450,0(45)	1118(12)
B5	550,88	450,0(45)	1224(13)
B6	950,00	700(15)	1357(29)

V obecném případě měření aktivity radionuklidů v daném vzorku je potřebné znát také charakter radiačního pozadí detektoru použitého k měření, aby mohlo toto pozadí být následně odečteno od spektra vzorku. V detektoru GC3018 bylo s velkou nejistotou zjištěno malé množství ¹³⁷Cs, menší však než hodnoty nejistot množství ¹³⁷Cs ve vzorcích. Radiační pozadí tedy nemuselo být od půdních vzorků odečítáno. V pozadí GWD-3023 nebylo ¹³⁷Cs zjištěno vůbec. Oba detektory nenaměřily

ve svých radiačních pozadích žádné ^{134}Cs . Tabulky 2.3 a 2.4 uvádějí počty registrovaných fotonů o energii čáry radiocesia v pozadí a ve zkoumaných vzorcích, kde hodnoty Ch jsou čísla kanálů měření, na kterých byla čára radiocesia zjištěna.

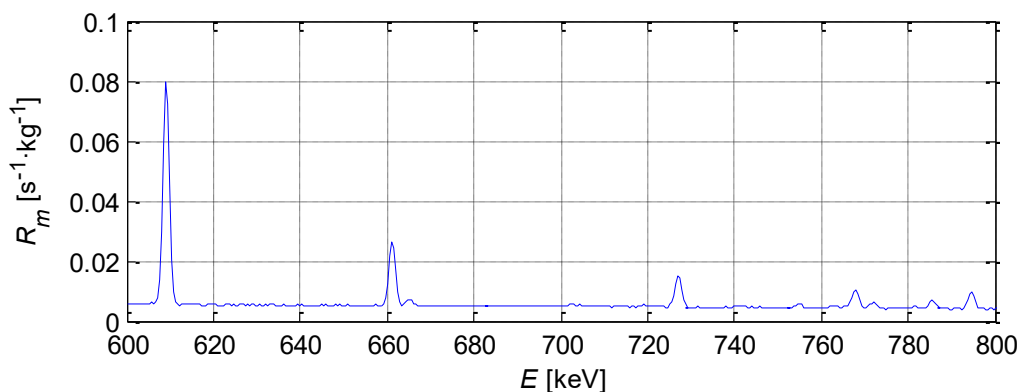
Tabulka 2.3: Radiační pozadí použitých detektorů na čáře vyzařování ^{137}Cs

Detektor	t_l [s]	Ch	R	$u_{r,R}$ [%]	R_t [s^{-1}]
GC3018	244 839	1490,32	158	56,6	0,000 64
GWD-3023	691 401,48	3580,50	-	-	-

Tabulka 2.4: Naměřená množství registrovaných fotonů R pocházejících z ^{137}Cs ve vzorcích, kde ve sloupci s daty jsou uvedeny dny ukončení měření a kde $R_t = R/t_l$.

Vrstva	Datum	t_l [s]	Ch	R	$u_{r,R}$ [%]	R_t [s^{-1}]
Mech	12. 12. 2019	872 97	1492,30	9247	1,6	0,105 9
L1	18. 12. 2019	755 70	1492,30	25 001	0,8	0,330 8
L2	5. 12. 2019	176 166	1492,75	383 223	0,2	2,175
A	19. 11. 2019	979 09,36	3580,50	260 968	0,6	2,665
B1	6. 12. 2019	673 07	1492,59	88 607	0,4	1,317
B2	20. 12. 2019	172 277	1492,41	65 372	0,5	0,379 5
B3	17. 1. 2020	272 349	1492,60	31 701	1,2	0,116 4
B4	17. 12. 2019	439 983	1492,99	25 406	1,7	0,057 74
B5	14. 1. 2020	420 224	1492,10	13 299	2,1	0,031 65
B6	27. 11. 2019	505 917,74	3580,26	12 201	2,7	0,024 12

V žádném ze vzorků nebyly na čáře 604,721 keV zjištěny žádné fotony kromě pozadí. Na čáře 795,864 keV fotony registrovány byly. Jelikož však ^{134}Cs vyzařuje na obou energiích s podobnými hodnotami pravděpodobnosti (Tabulka 1.3), musí být fotony naměřeny na obou čarách. Jelikož však nejsou, nemohou fotony píku o energii 795,864 keV pocházet z ^{134}Cs . Jejich zdroj byl identifikován jako radionuklid ^{228}Ac , který má svůj původ v přeměnové řadě thoria podle obrázku 1.4. Názorné spektrum na obrázku 2.5 bylo získáno po provedení energetické kalibrace popsané v podkapitole 2.3.



Obrázek 2.5: Graf intervalu spektra vzorku vrstvy B4 od energie 600 keV do 800 keV

2.3 Energetická kalibrace

V softwarech SpectraLineGP a GENIE 2000 se ve výstupu měření spektra vzorku vyskytuje N jako počet registrovaných fotonů γ nebo RTG záření, a to v závislosti na kanálu Ch , ne na energii E [33].

Ke grafickému zobrazení závislosti počtu registrovaných fotonů na energii těchto fotonů je potřebná energetická kalibrace detektoru, kterou je nutno provést i pro identifikaci neznámých čar ve spektru. Tato kalibrace probíhá měřením spektra vzorku vyzařujícího na známých hodnotách energií. Tímto kalibračním vzorkem může být samotný zkoumaný vzorek, pokud obsahuje snadno identifikovatelné radionuklidy a vyzařuje tedy fotony o nám známé energii charakteristické pro tyto radionuklidy. V obecném případě je vhodnější k energetické kalibraci použít předem připravený etalon obsahující dané přesné množství určitých radionuklidů využitelný i pro účinnostní kalibraci.

Energetická kalibrace hledá přepočtový koeficient k sloužící k výpočtu hodnoty energie E z čísla kanálu měření Ch . Platí tedy:

$$k = \frac{E}{Ch} \quad (2.3)$$

Hodnota koeficientu k však nemusí být v celém zkoumaném intervalu energetického spektra konstantní. Aproximace k na konstantu by byla dostatečující pro úzký interval hodnot energií v okolí hodnoty E , pomocí které je kalibrace prováděna. Na intervalu zahrnujícím širokou část energetického spektra je tedy vhodné využít větší množství referenčních hodnot energií E_i . Hodnota k pak nebude konstantou, ale bude určena polynomem stupně $m-1$ pro m referenčních hodnot energií E_i .

Tento polynom získáme vyřešením soustavy rovnic, kde k_i jsou koeficienty přepočtu Ch_i na E_i , odpovídající zvoleným referenčním hodnotám kanálů Ch_i a energií E_i . Hodnoty a_i jsou koeficienty, které hledáme výpočtem této soustavy rovnic, která má tvar:

$$k_1 = a_1 + a_2 Ch_1 + a_3 Ch_1^2 + \dots + a_m Ch_1^{m-1} \quad (2.2)$$

$$k_2 = a_1 + a_2 Ch_2 + a_3 Ch_2^2 + \dots + a_m Ch_2^{m-1} \quad (2.2)$$

$$k_3 = a_1 + a_2 Ch_3 + a_3 Ch_3^2 + \dots + a_m Ch_3^{m-1} \quad (2.4)$$

\vdots

$$k_m = a_1 + a_2 Ch_m + a_3 Ch_m^2 + \dots + a_m Ch_m^{m-1}. \quad (2.2)$$

Vyřešením soustavy rovnic, tedy nalezením koeficientů a_i , získáme vztah pro k platný pro všechny kanály Ch na celém zkoumaném intervalu energií E :

$$k = a_1 + a_2 Ch + a_3 Ch^2 + \dots + a_m Ch^{m-1}. \quad (2.5)$$

Pro energetickou kalibraci ve všech vrstvách půdního profilu a radiačního pozadí detektoru GC3018 byly identifikovány a zvoleny čtyři radionuklidy s výraznými píky o energiích E (Tabulka 2.5). Koeficient k je určen polynomem třetího stupně. Pro energetickou kalibraci radiačního pozadí detektoru GWD-3023 byly zvoleny dva radionuklidy a energie fotonů vznikajících při anihilaci elektronu s pozitronem (Tabulka 2.6). V tomto případě bude k výsledkem kalibračního polynomu

druhého stupně. Hodnota energie fotonů (510,998 93 keV) vznikajících při anihilaci elektronů s pozitrony byla vypočtena z klidové hmotnosti elektronu ($9,109\,382\,91 \cdot 10^{-31}$ kg), elementárního náboje ($1,602\,176\,565 \cdot 10^{-19}$ C) a rychlosti světla ve vakuu ($299\,792\,458$ m·s⁻¹). Tyto hodnoty byly získány z tabulek [34].

Tabulka 2.5: Čísla kanálů Ch korespondující s energiemi E píků radionuklidů zvolených pro energetickou kalibraci detektoru GC3018

Vzorek	Radionuklid	²²⁶ Ra	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²⁰⁸ Tl
	E [keV]	186,211(13)	661,657 0(30)	1460,83	2614,533(13)
Pozadí GC3018		419,94	1490,32	3296,74	5901,99
Mech		419,73	1492,30	3294,65	5898,37
L1		419,41	1492,30	3294,62	5898,14
L2		420,26	1492,75	3295,53	5899,91
A		1013,553	3580,499	7891,468	14 120,344
B1		420,19	1492,59	3295,16	5899,27
B2		420,04	1492,41	3294,75	5898,53
B3		419,95	1492,60	3294,09	5897,30
B4		420,00	1492,99	3294,40	5897,85
B5		420,07	1492,10	3294,07	5897,27
B6		1012,052	3580,256	7837,411	14 113,390

Tabulka 2.6: Čísla kanálů Ch korespondující s energiemi E píků pro energetickou kalibraci pozadí detektoru GWD-3023

Zdroj	E [keV]	Ch
Anihilace e^+, e^-	510,998 93	2766,96
⁴⁰ K	1460,83	7889,74
²⁰⁸ Tl	2614,533(13)	14 110,63

Koeficienty a_i se pro každé měření liší. Výsledný kalibrační polynom má následující tvar:

$$k = a_1 + a_2 Ch + a_3 Ch^2 + a_4 Ch^3. \quad (2.6)$$

Koeficienty a_i pro tento kalibrační polynom jsou uvedeny v tabulce 2.7.

Tabulka 2.7: Vypočtené koeficienty a_1 , a_2 , a_3 a a_4 , kde pro koeficienty a_i jsou uvedeny čtyři platné číslice, pro ostatní koeficienty pouze tři platné číslice.

Vzorek	a_1	a_2	a_3	a_4
Pozadí GC3018	0,442 8	$1,72 \cdot 10^{-6}$	$-7,60 \cdot 10^{-10}$	$8,01 \cdot 10^{-14}$
Pozadí GWD-3023	0,184 3	$1,61 \cdot 10^{-7}$	$-6,33 \cdot 10^{-12}$	0
Mech	0,443 8	$-5,43 \cdot 10^{-7}$	$1,85 \cdot 10^{-10}$	$-1,85 \cdot 10^{-14}$
L1	0,444 4	$-1,21 \cdot 10^{-6}$	$4,00 \cdot 10^{-10}$	$-3,86 \cdot 10^{-14}$
L2	0,443 0	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$-7,73 \cdot 10^{-11}$	$5,84 \cdot 10^{-15}$
A	0,183 0	$7,81 \cdot 10^{-7}$	$-9,16 \cdot 10^{-11}$	$3,33 \cdot 10^{-15}$
B1	0,443 1	$2,27 \cdot 10^{-7}$	$-5,94 \cdot 10^{-11}$	$4,13 \cdot 10^{-15}$
B2	0,443 3	$2,04 \cdot 10^{-8}$	$7,74 \cdot 10^{-12}$	$-2,17 \cdot 10^{-15}$
B3	0,443 5	$-3,89 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-10}$	$-1,95 \cdot 10^{-14}$
B4	0,443 6	$-5,70 \cdot 10^{-7}$	$2,52 \cdot 10^{-10}$	$-2,76 \cdot 10^{-14}$
B5	0,443 2	$2,64 \cdot 10^{-7}$	$-7,12 \cdot 10^{-11}$	$5,25 \cdot 10^{-15}$
B6	0,183 8	$9,60 \cdot 10^{-8}$	$6,57 \cdot 10^{-11}$	$-4,63 \cdot 10^{-15}$

Pro každý vzorek je závislost velikosti přepočtového koeficientu k na kanálu Ch téměř lineární, což je patrné z velikostí koeficientů a_i v tabulce 2.7, kde a_1 má alespoň o pět řádů vyšší hodnoty, než následující koeficient. Zbývající dva koeficienty jsou ještě mnohem menší.

2.3.1 Grafy spekter

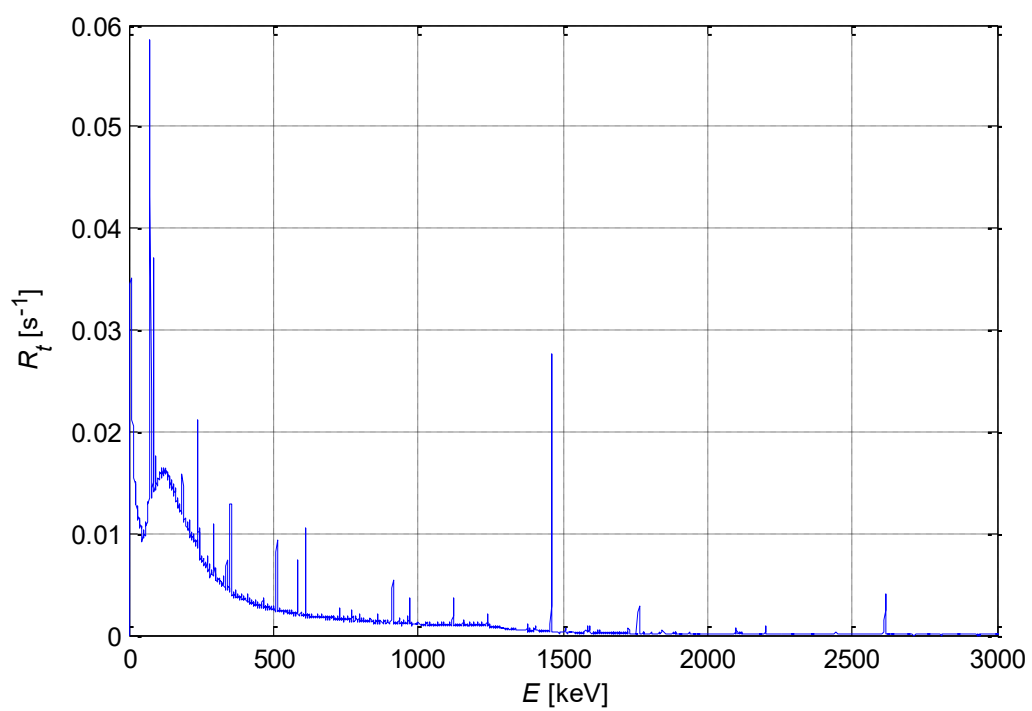
Po provedení energetické kalibrace byla data ze softwarů GENIE2000 a SpectraLineGP vnesena do grafů. V těchto grafech je zobrazen počet registrovaných pulzů za sekundu v jednom kilogramu hmotnosti čerstvých vzorků v závislosti na příslušných hodnotách energií zachycených fotonů (Obrázky 2.8 až 2.17), což proběhlo podle vztahu:

$$R_m = \frac{10^6 R_t}{V \rho_{\xi}}. \quad (2.7)$$

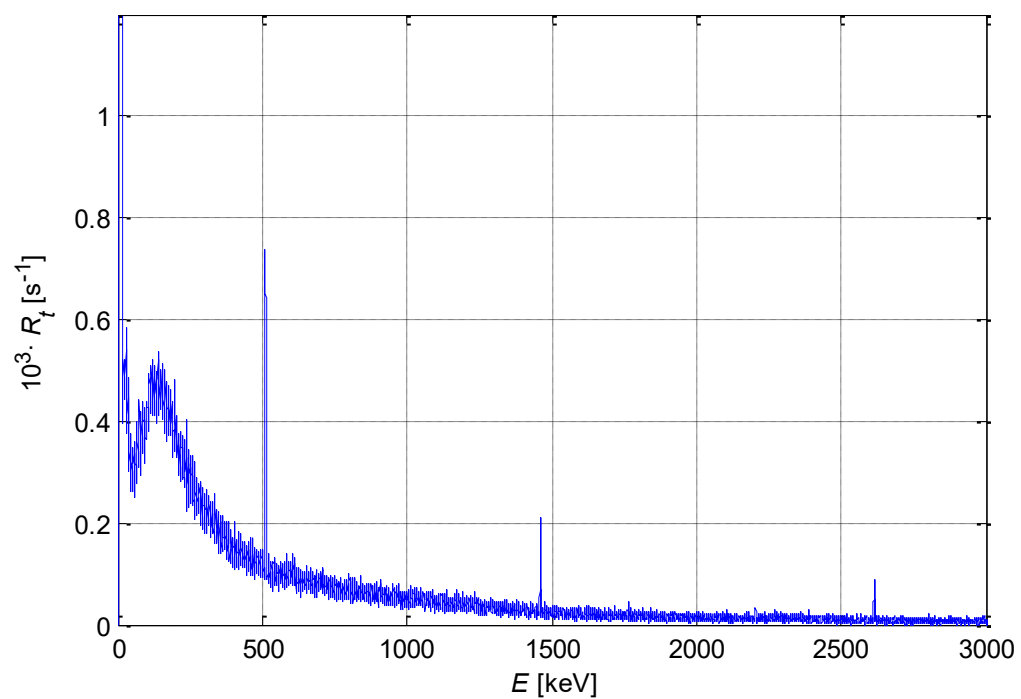
Pro pozadí detektorů (Obrázky 2.6 a 2.7) nebyl přepočet počtu pulzů na hmotnost proveden. Tabulka 2.8 uvádí některé výrazné spektrální čáry patrné ve všech grafech na obrázcích 2.6 až 2.17.

Tabulka 2.8: Vybrané spektrální čáry identifikované v energetickém spektru vzorků

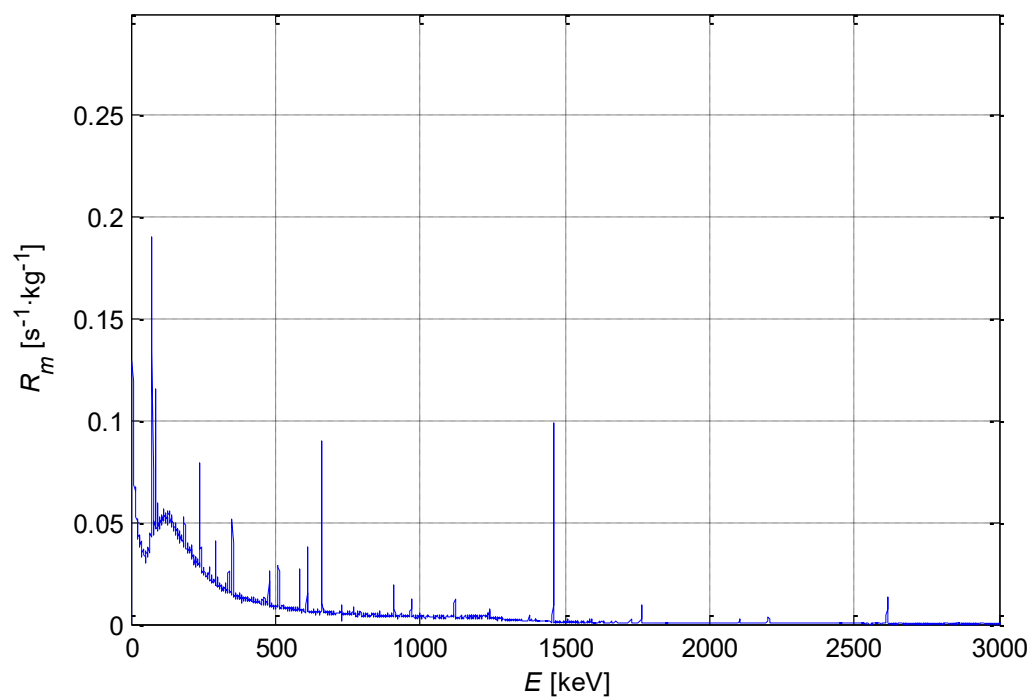
Zdroj	E [keV]
Anihilace e^+, e^-	510,998 93
^{137}Cs	661,657 0(30)
^{40}K	1460,830
^{208}Tl	2614,533(13)



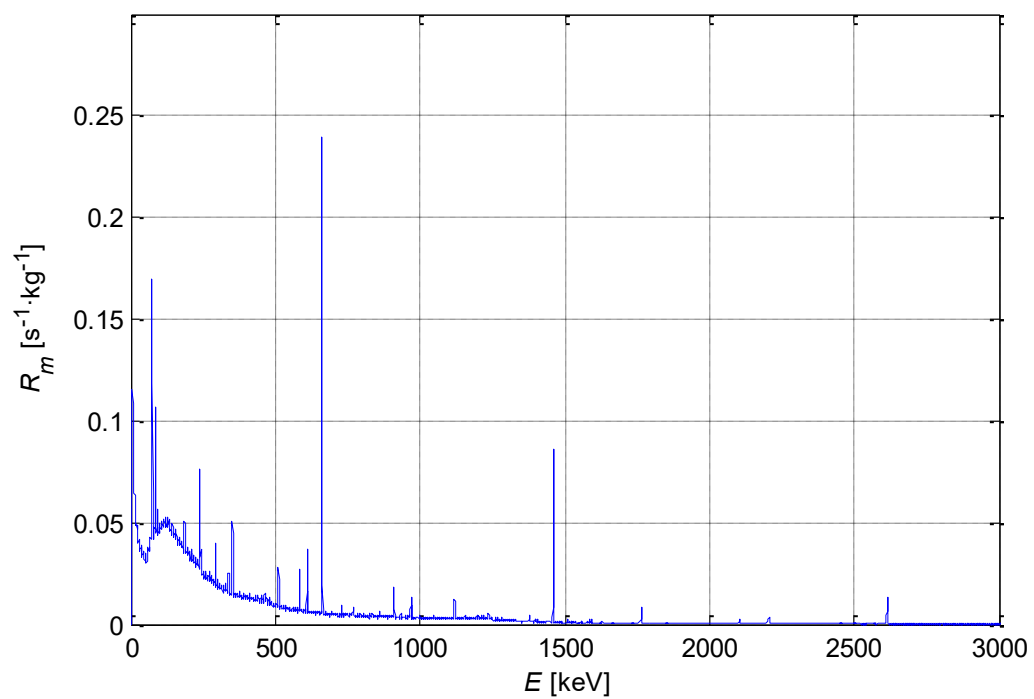
Obrázek 2.6: Graf radiačního pozadí detektoru GC3018



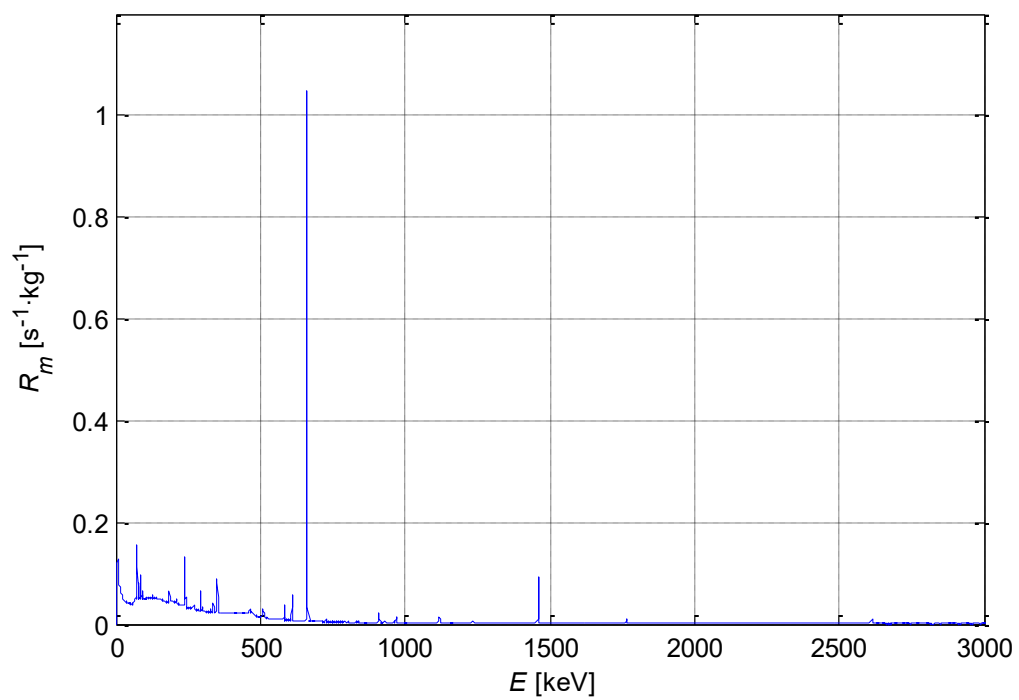
Obrázek 2.7: Graf radiačního pozadí detektoru GWD-3023



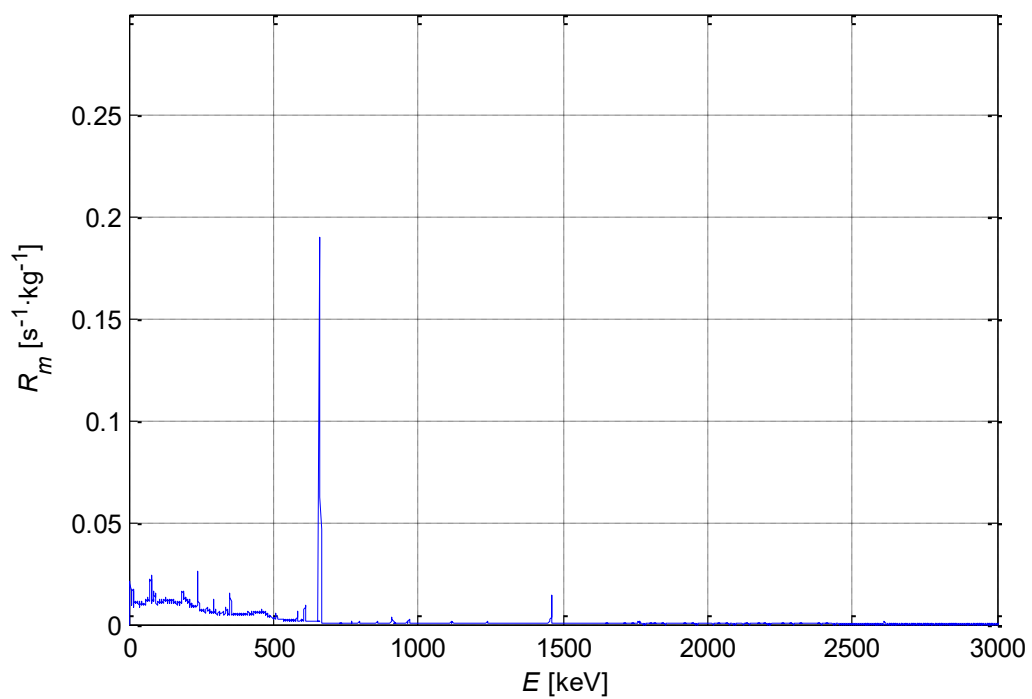
Obrázek 2.8: Graf spektra vzorku mechu



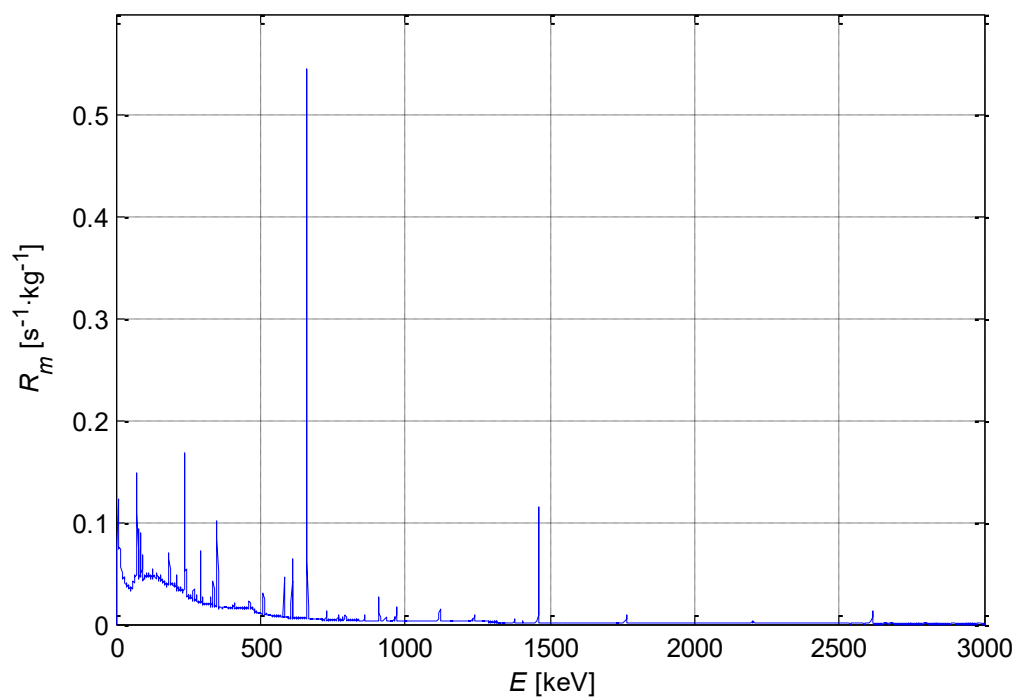
Obrázek 2.9: Graf spektra vzorku z vrstvy L1



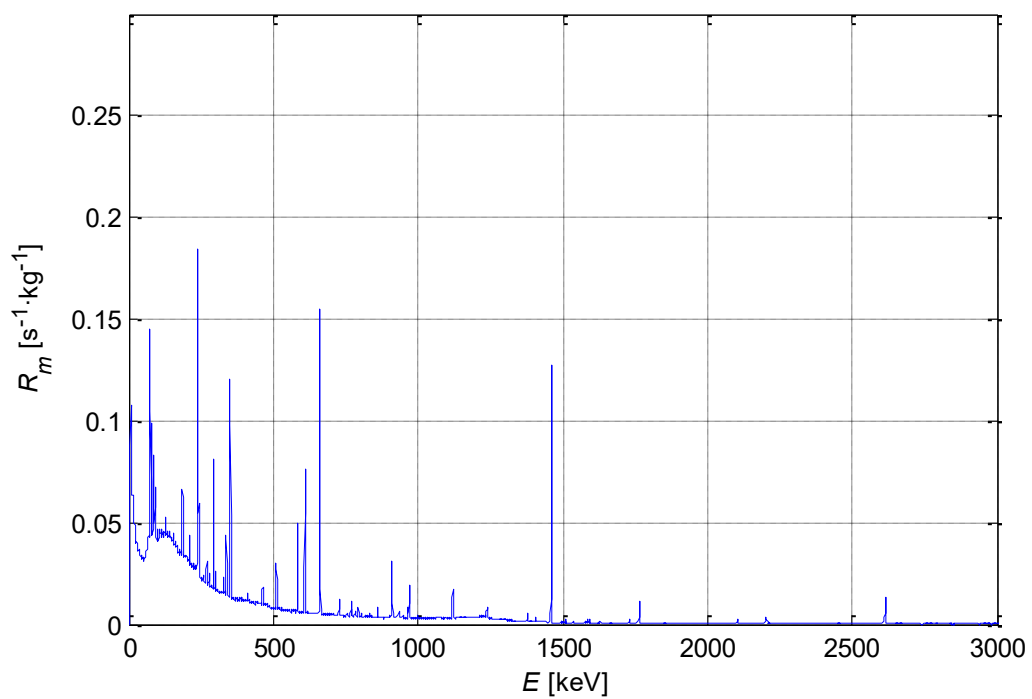
Obrázek 2.10: Graf spektra vzorku z vrstvy L2



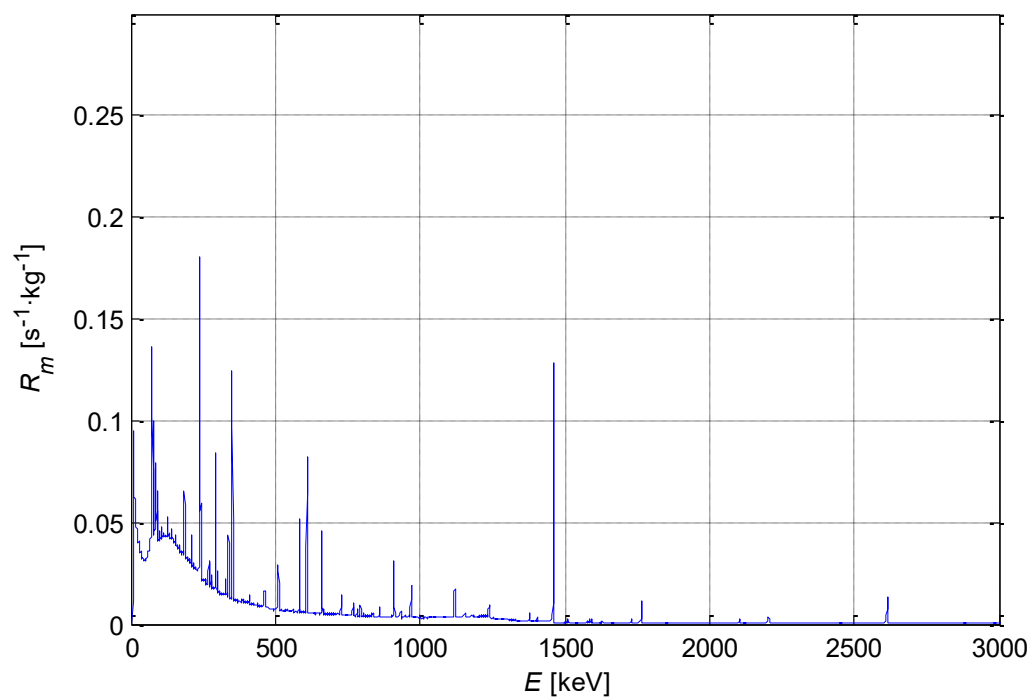
Obrázek 2.11: Graf spektra vzorku z vrstvy A



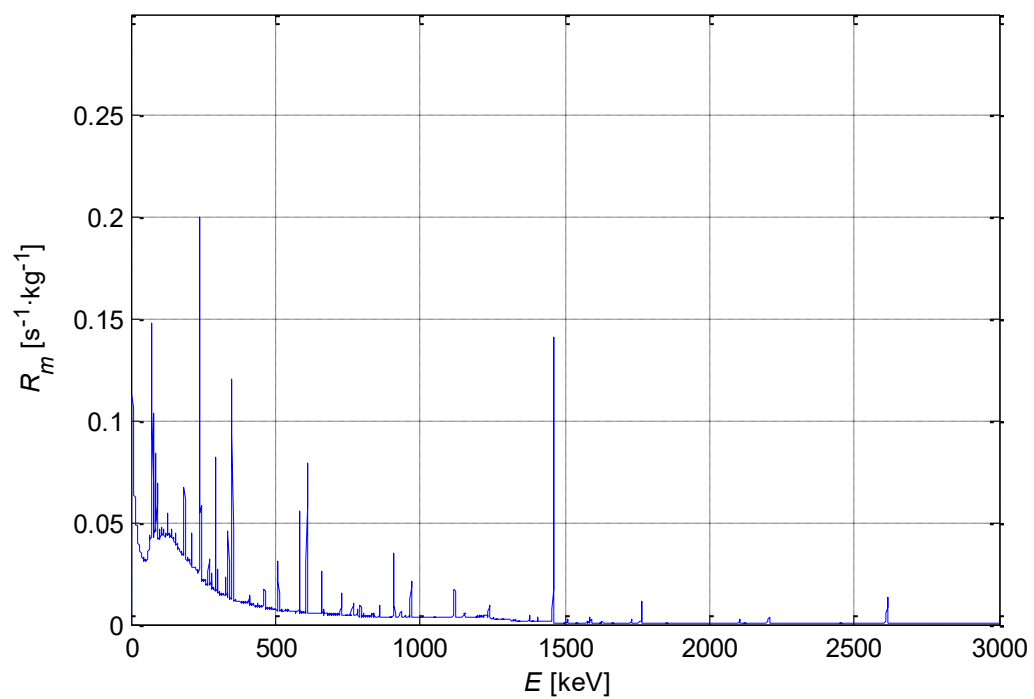
Obrázek 2.12: Graf spektra vzorku z vrstvy B1



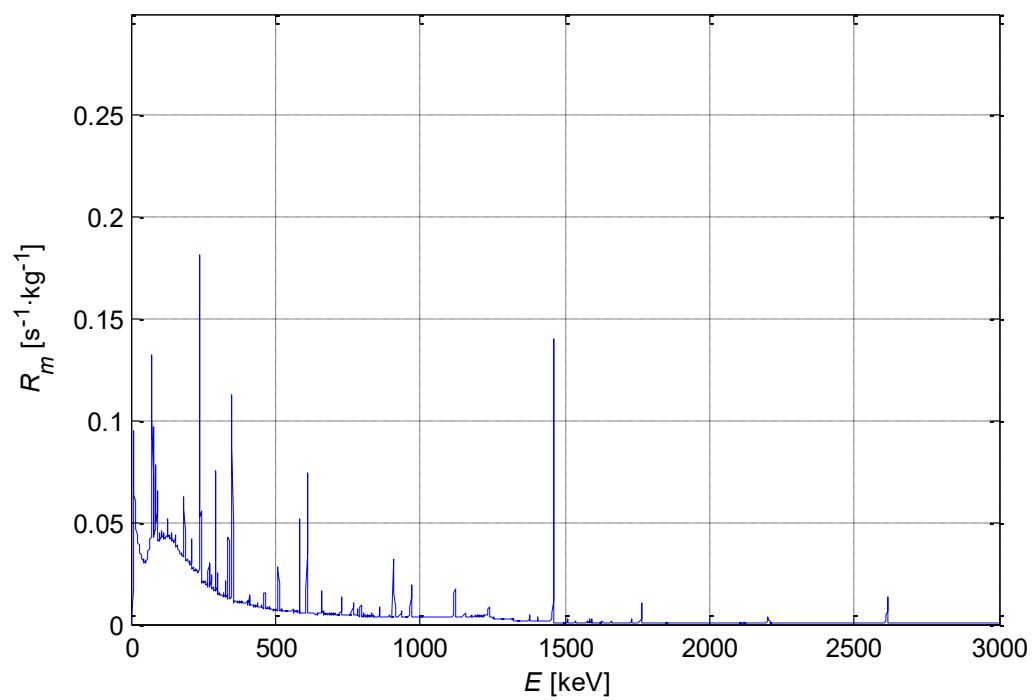
Obrázek 2.13: Graf spektra vzorku z vrstvy B2



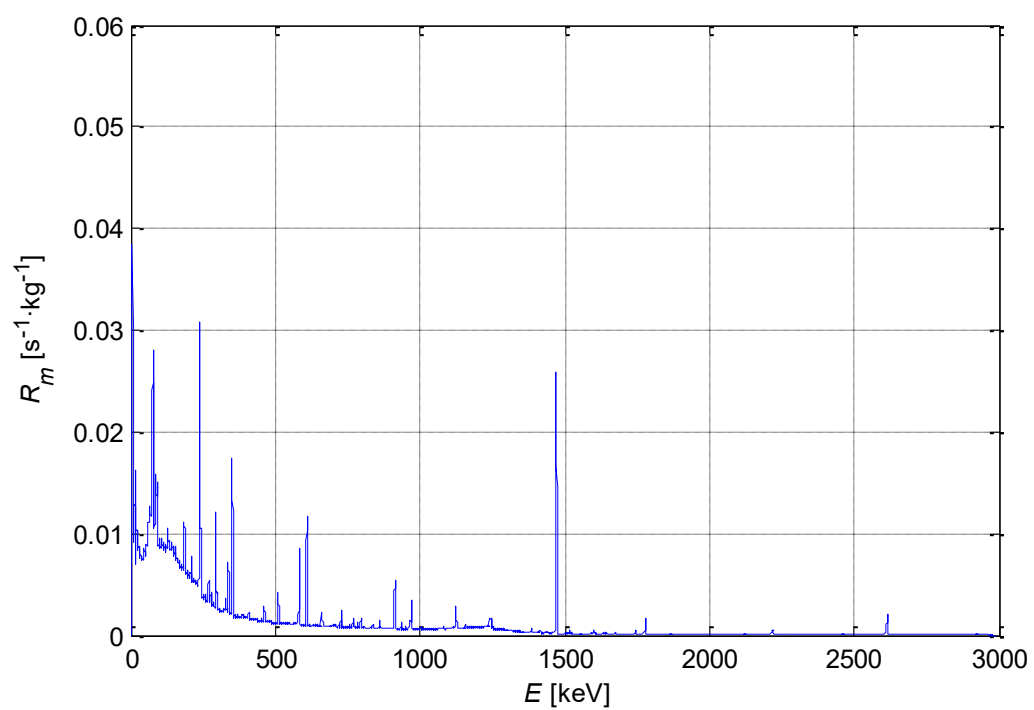
Obrázek 2.14: Graf spektra vzorku z vrstvy B3



Obrázek 2.15: Graf spektra vzorku z vrstvy B4



Obrázek 2.16: Graf spektra vzorku z vrstvy B5



Obrázek 2.17: Graf spektra vzorku z vrstvy B6

2.4 Účinnostní kalibrace

Účinnost detekce záření ε představuje poměr mezi počtem fotonů R zaregistrovaných detektorem a aktivitou A kalibračního vzorku. Účinnost detekce záření je závislá na jeho energii, protože fotony o různých energiích vykazují při interakci s materiálem detektoru různé vlastnosti. Jedná se o interakce jako je tvorba brzdného záření, Comptonův rozptyl, nebo absorpce záření hmotou detektoru. Při účinnostní kalibraci je nutno znát hodnotu P_γ , tedy pravděpodobnost, se kterou kalibrační radionuklid vyzařuje fotony o energii, na které je účinnostní kalibrace prováděna. Pro účinnost detekce záření platí [33]:

$$\varepsilon = \frac{R_t}{A \frac{P_\gamma}{100}}. \quad (2.8)$$

Účinnostní kalibrace každého z použitých detektorů byla provedena pomocí etalonů, jejichž geometrie, tedy tvar a objem, se shodovala s měřenými vzorky. Tyto etalony tvoří silikonový kaučuk doplněný o rovnoměrně prostorově rozptýlené radionuklidy o předem známých hodnotách aktivity, které byly získány z certifikátů k těmto etalonům přiložených (Tabulky 2.9, 2.10, 2.12 a 2.13). V den měření byly hodnoty těchto aktivit nižší, než hodnoty uvedené v certifikátech. Proto musely být přepočteny k datům měření podle zákona radioaktivní přeměny, tedy vztahu (1.2). Výsledky účinnostní kalibrace jsou shrnuty v tabulkách 2.11 a 2.14.

2.4.1 Účinnostní kalibrace detektoru GC3018

Tabulka 2.9: Základní údaje o etalonu použitém ke kalibraci detektoru GC3018 [35]

Číslo certifikátu	9031-OL-563/13
Výrobní číslo	200913-1425020
Referenční datum	15. 10. 2013
Objem	450,0(45) cm ³
Hustota	985,0(10) kg·m ⁻³

Tabulka 2.10: Výčet radionuklidů přítomných v kalibračním etalonu 200913-1425020, kde A_0 je referenční hodnota aktivity každého radionuklidu k datu 15. října 2013.

Radionuklid	T [d]	A_0 [Bq]	$u_{r,A}$ [%]
^{241}Am	157 753	3885	1,1
^{109}Cd	462,6	15 190	1,5
^{57}Co	271,79	831	1,9
^{139}Ce	137,64	865	1,7
^{203}Hg	46,612	2180	2,3
^{113}Sn	115,09	3968	1,3
^{85}Sr	64,84	4143	1,5
^{137}Cs	10 975,55	2246	1,2
^{88}Y	106,65	5060	1,1
^{60}Co	1924,061	2359	1,1
^{60}Co	1924,061	2359	1,1
^{88}Y	106,65	5060	1,1

Tabulka 2.11: Vybrané radionuklidy v etalonu 200913-1425020. Měření etalonu bylo provedeno 3. prosince 2019. Podle vztahu (2.8) byly vypočteny hodnoty ε . Pro výpočet aktivity ^{137}Cs ve vzorcích je nutná jen znalost ε pro pík o energii 661,657 keV.

Radionuklid	A [Bq]	E [keV]	P_γ [%]	R_t [s^{-1}]	ε	$u_{r,\varepsilon}$ [%]
^{241}Am	3847	59,541 20(20)	35,90(40)	10,763(11)	0,007 79(13)	1,6
^{109}Cd	529,6	88,040(50)	3,61(10)	0,662 0(80)	0,034 6(12)	3,4
^{57}Co	2,745	122,061 40(40)	85,60(17)	0,093 3(63)	0,039 7(28)	7,0
^{137}Cs	1950	661,657 0(30)	85,10(20)	26,817(27)	0,016 20(20)	1,3
^{60}Co	1053	1173,237 0(40)	99,973 60(70)	10,080(10)	0,009 58(11)	1,1
^{60}Co	1053	1332,501 0(50)	99,985 60(40)	9,104 6(91)	0,008 70(10)	1,1

2.4.2 Účinnostní kalibrace detektoru GWD-3023

Tabulka 2.12: Základní údaje o etalonu použitém ke kalibraci detektoru GWD-3032 [36].

Číslo certifikátu	1035-SE-40518-17
Výrobní číslo	260717-1647024
Referenční datum	1. 9. 2017
Objem	700,0(70) cm^3
Hustota	980,0(10) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Tabulka 2.13: Výčet radionuklidů přítomných v kalibračním etalonu 260717-1647024, kde A_0 je referenční hodnota aktivity každého radionuklidu k datu 1. září 2017.

Radionuklid	T [d]	A_0 [Bq]	$u_{r,A}$ [%]
^{241}Am	157 753	4252	1,1
^{109}Cd	462,6	14 980	1,5
^{57}Co	271,79	930,9	1,9
^{139}Ce	137,64	1143	1,7
^{51}Cr	27,7025	20 490	1,7
^{113}Sn	115,09	2668	1,3
^{85}Sr	64,84	4807	1,5
^{137}Cs	10 975,55	2098	1,2
^{88}Y	106,65	5646	1,1
^{60}Co	1924,061	2413	1,1
^{60}Co	1924,061	2413	1,1
^{88}Y	106,65	5646	1,1

Tabulka 2.14: Vybrané radionuklidy v etalonu 260717-1647024. Měření bylo provedeno 19. listopadu 2019. Hodnoty účinnosti ε byly vypočteny podle vztahu (2.8). Pro výpočet aktivity ^{137}Cs ve vzorcích je nutná jen znalost ε na čáře 661,657 keV.

Radionuklid	A [Bq]	E [keV]	P_γ [%]	R_t [s^{-1}]	ε	$u_{r,\varepsilon}$ [%]
^{241}Am	4237	59,541 20(20)	35,90(40)	19,3(18)	0,012 7(13)	9,6
^{109}Cd	4457	88,040(50)	3,61(10)	5,70(18)	0,035 4(16)	4,5
^{57}Co	118,3	122,061 40(40)	85,60(17)	1,75(20)	0,017 3(21)	12
^{137}Cs	1994	661,657 0(30)	85,10(20)	21,35(29)	0,012 58(24)	1,9
^{60}Co	1803	1173,237 0(40)	99,973 60(70)	13,57(29)	0,007 53(19)	2,5
^{60}Co	1803	1332,501 0(50)	99,985 60(40)	12,28(19)	0,006 81(14)	2,0

2.4.3 Naměřená aktivita vzorků

Po nalezení hodnot účinnosti detekce ε byly hodnoty počtu registrovaných fotonů R z tabulky 2.4 přepočteny na aktivitu A' podle vztahu:

$$A' = \frac{R_t}{\varepsilon P_\gamma} \cdot \frac{100}{100} \quad (2.9)$$

Přepočet na kilogram hmotnosti čerstvé zeminy byl proveden podle následujícího vztahu, kde se člen 10^6 vyskytuje kvůli přepočtu objemu z cm^3 na m^3 :

$$A'_m = \frac{10^6 A'}{V \rho_\varepsilon} \quad (2.10)$$

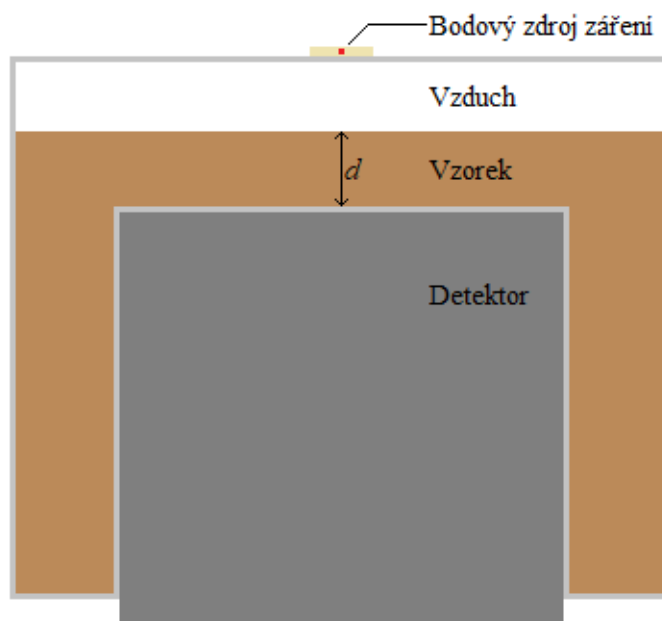
Hodnoty A'_m v tabulce 2.15 představují aktivitu ^{137}Cs po provedení účinnostní kalibrace. Nejedná se však o konečné výsledky. Pro jejich získání je potřebné provést korekci kvůli hustotě měřených vzorků.

Tabulka 2.15: Naměřená aktivita ^{137}Cs ve vzorcích

Vzorek	$V [\text{cm}^3]$	$\rho_s [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$A' [\text{Bq}]$	$A'_m [\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Mech	450,0(45)	709,3(71)	7,70(16)	24,13(60)
L1	450,0(45)	797,0(80)	24,05(36)	67,1(14)
L2	450,0(45)	1160(12)	158,2(20)	302,9(58)
A	700(15)	1227(27)	288,6(71)	336(13)
B1	450,0(45)	1316(14)	95,7(13)	161,7(32)
B2	450,0(45)	1367(14)	27,59(38)	44,85(88)
B3	450,0(45)	1465(15)	8,46(15)	12,83(15)
B4	450,0(45)	1376(14)	4,198(89)	6,78(18)
B5	450,0(45)	1471(15)	2,301(57)	3,477(99)
B6	700(15)	1607(35)	2,612(64)	2,322(91)

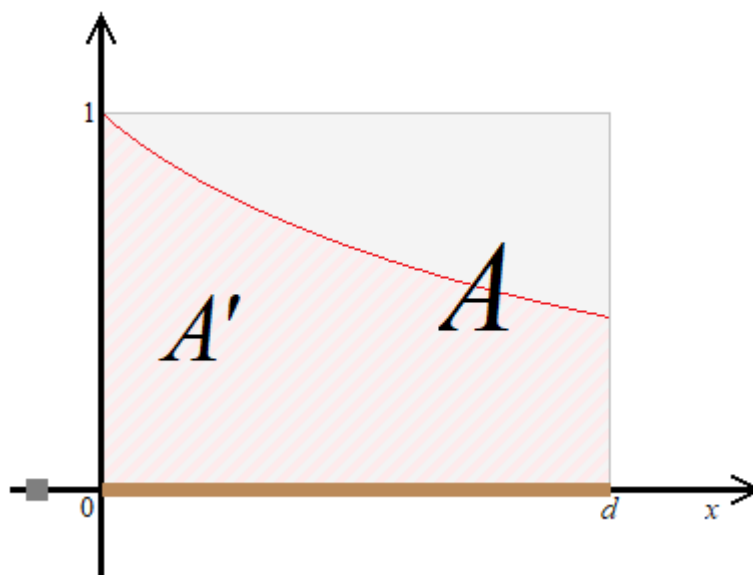
2.5 Korekce hodnot aktivity na hustotu vzorků

Pomocí účinnostní kalibrace byly počty registrovaných fotonů záření přepočteny na hodnoty aktivit A' . Skutečná aktivita A každého ze vzorků je však vyšší, a to kvůli absorpci části fotonů gama záření samotnými vzorky. Měřené vzorky mají složitou trojrozměrnou geometrii. Pro nalezení aktivit A je tedy vhodné systém detektoru a vzorku nahradit vhodně zvolenou aproximací.



Obrázek 2.18: Náčrt sestavy detektoru, vzorku a bodového zářiče

Geometrie měření na obrázku 2.18 byla zjednodušena na model na obrázku 2.19. Tento model předpokládá jednorozměrný zdroj záření, jehož aktivita v libovolném bodě zdroje je konstantní. V obrázku 2.19 je jeho celková aktivita zastoupena šedým obdélníkem o obsahu A . Detektor umístěný na ose x mimo zdroj však kvůli absorpci záření ve zdroji detekuje jen růžově vyšrafovanou část A' .



Obrázek 2.19: Aproximační model jednorozměrného zdroje záření

Okamžitá hodnota měřené aktivity pocházející z bodu uvnitř pohlcujícího zdroje klesá se vzdáleností x od okraje podle vztahu:

$$A = A_0 e^{\frac{-\ln 2}{D} x}. \quad (2.11)$$

Pro potřeby korekce měřené aktivity je nutno znát polotloušťku D zkoumaného vzorku a jeho rozměr d . Poměr mezi skutečnou a naměřenou aktivitou je vyjádřen podílem obsahu obdélníka o rozměrech $1 \times d$ a integrálu funkce popisující pokles počtu detekovaných fotonů po prostupu pohltivým materiálem:

$$\frac{A}{A'} = \frac{d}{\int_0^d e^{\frac{-\ln 2}{D} x} dx}. \quad (2.12)$$

Po výpočtu integrálu má dostaneme:

$$\frac{A}{A'} = \frac{d}{-\frac{D}{\ln 2} \left(e^{\frac{-\ln 2}{D} d} - 1 \right)}, \quad (2.13)$$

kde délka zdroje d , tedy tloušťka vrstvy vzorku v místě nad detektorem byla změřena jako 1,27 cm a je stejná pro všechny hodnocené půdní vzorky. Nejistota této hodnoty nebyla uvažována.

Pro určení polotloušťky vzorků byl použit bodový zdroj záření s ^{137}Cs (Tabulka 2.16), který byl umístěn nad některé vybrané vzorky podle obrázku 2.17. Následně byl měřen počet registrovaných fotonů po prostupu záření vzorky a prázdnou nádobou. Použitý bodový zdroj záření je tvořen k sobě tepelně svařenými plastickými fóliemi, mezi který byl před svařením nanesen etalonový roztok a vysušen. Plošná hustota fólie je $(22 \pm 0,2) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Tabulka 2.16: Údaje o bodovém zdroji s radionuklidem ^{137}Cs

Výrobní číslo	020914-1273015	$u_{r,A} [\%]$
$A [\text{Bq}]$ (15. 9. 2014)	900 40	0,6
$A [\text{Bq}]$ (10. 3. 2020)	793 40	0,6

Po provedení měření soustav vzorků s bodovým zářičem byly v tabulce 2.17 zaznamenány hodnoty $R_{t,v,z}$ jako počty registrovaných fotonů za sekundu pocházející z těchto soustav, a to na čáře energie 661,657 keV charakteristické pro ^{137}Cs . Hodnoty $R_{t,v}$ jsou počty registrovaných fotonů pocházejících ze vzorků samotných, opsané z tabulky 2.4, kde jsou tyto hodnoty označeny jako R_t . Hodnoty $R_{t,z} = R_{t,v,z} - R_{t,v}$ pochází z bodového zdroje po prostupu vzorkem. $R_{t,0}/R_{t,z}$ je podíl počtu pulzů registrovaných po průchodu prázdnou nádobou a počtu pulzů po prostupu jinými vzorky. Jedná se tedy o podíl intenzity nepohlčeného záření ku pohlčenému, kde pohlitvost záření vzduchem byla zanedbána.

Tabulka 2.17: Hodnoty počtu registrovaných fotonů v soustavách vzorků a bodového zářiče

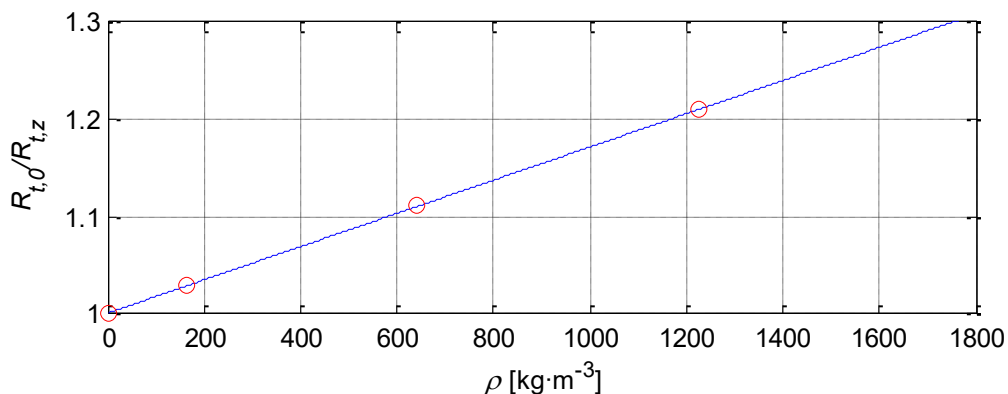
Vzorek	$\rho_s [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$R_{t,v,z} [\text{s}^{-1}]$	$R_{t,v} [\text{s}^{-1}]$	$R_{t,z} [\text{s}^{-1}]$	$R_{t,0}/R_{t,z}$
Prázdná nádoba	1,225	692,0(21)	-	692,0(21)	1
Mech	163,3(17)	671,8(21)	0,105 9(17)	671,7(21)	1,030 3(44)
L2	642,2(65)	625,0(19)	2,175 4(44)	622,9(19)	1,111 0(48)
B5	1224(13)	572,1(23)	0,031 65(67)	572,1(23)	1,209 6(61)

Mezi poměrem $R_{t,0}/R_{t,z}$ (kde jako $R_{t,0}$ byla označena hodnota $R_{t,z}$ pro prázdnou nádobu z tabulky 2.17) a hustotou vzorku byla vypořazována lineární závislost. Tohoto poznatku bylo využito k proložení hodnot ρ_s a $R_{t,0}/R_{t,z}$ z tabulky 2.17 lineární funkcí získanou metodou nejmenších čtverců podle vztahu:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n 1 & \sum_{i=1}^n \rho_{s,i} \\ \sum_{i=1}^n \rho_{s,i} & \sum_{i=1}^n \rho_{s,i}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{R_{t,0}}{R_{t,z,i}} \\ \sum_{i=1}^n \left(\rho_{s,i} \frac{R_{t,0}}{R_{t,z,i}} \right) \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Koeficienty α_i zaokrouhleny na čtyři platná místa byly vypočteny jako $\alpha_0 = 1,001$ a $\alpha_1 = 1,706 \cdot 10^{-4}$. Lineární funkce vnesena do grafu na obrázku 2.20 má tvar:

$$\frac{R_{t,0}}{R_{t,z}} = \alpha_0 + \alpha_1 \rho. \quad (2.15)$$



Obrázek 2.20: Graf podílů intenzity nepohlcovaného a pohlcovaného záření

Polotloušťka všech půdních vzorků a kalibračních etalonů byla nalezena pomocí upraveného vztahu (2.10), kde $x = d = 1,27$ cm a poměr $R_{t,z}/R_{t,0}$ byl určen podle vztahu (2.15):

$$D = \frac{-d \ln 2}{\ln \frac{R_{t,z}}{R_{t,0}}}. \quad (2.16)$$

V tabulce 2.18 jsou uvedeny hodnoty hustot suchých vzorků, poměrů $R_{t,0}/R_{t,z}$ podle vztahu (2.15), polotlouštěk D podle vztahu (2.16) a poměrů skutečných hodnot aktivit A k měřeným hodnotám aktivit A' určených podle vztahu (2.13). Koeficient q představuje poměr mezi A/A' vzorků a A_E/A'_E kalibračních etalonů (hodnoty v posledních dvou řádcích tabulky), kde pro vzorky A a B6 byl zvolen etalon 260717-1647024, pro ostatní vzorky etalon 200913-1425020. Pro samotné etalony je tento poměr roven 1, protože s jejich pomocí byla provedena účinnostní kalibrace a počet registrovaných fotonů byl s hodnotami aktivity ^{137}Cs srovnán bez nutnosti korekce na hustotu.

Tabulka 2.18: Výčet hodnot využitých pro výpočet koeficientů q

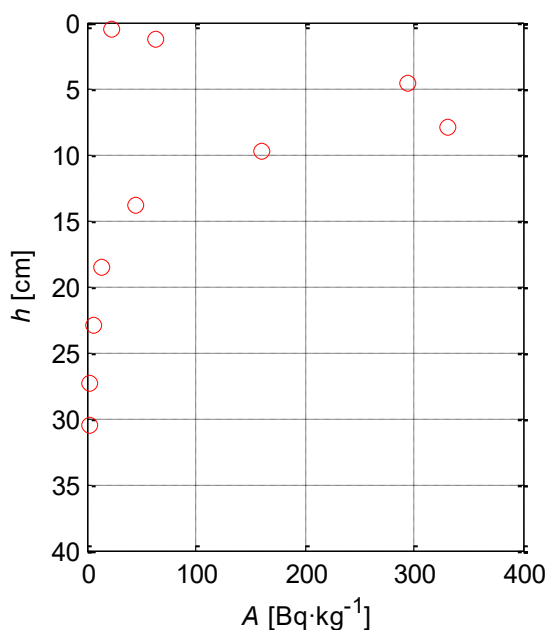
Vzorek	ρ_s [kg·m ⁻³]	$R_{t,0}/R_{t,z}$	D [cm]	A/A'	q
Mech	163,3(17)	1,028 9(52)	30,9 (54)	1,014 3(26)	0,939 0(33)
L1	211,3(22)	1,037 1(52)	24,2 (34)	1,018 3(26)	0,942 8(33)
L2	642,2(65)	1,110 6(56)	8,39 (40)	1,053 4(26)	0,975 2(34)
A	769(17)	1,132 3(57)	7,09 (29)	1,063 4(26)	0,984 8(34)
B1	920,4(92)	1,158 1(58)	6,00 (21)	1,075 2(27)	0,995 4(35)
B2	1038(11)	1,178 2(59)	5,37 (17)	1,084 2(27)	1,003 8(35)
B3	1156(12)	1,198 3(60)	4,87 (14)	1,093 2(27)	1,012 1(35)
B4	1118(12)	1,191 8(60)	5,02 (15)	1,090 3(27)	1,009 4(35)
B5	1224(13)	1,209 9(61)	4,62 (13)	1,098 3(27)	1,016 8(35)
B6	1357(29)	1,232 6(62)	4,21 (10)	1,108 2(27)	1,026 3(36)
200913-1425020	985,0(10)	1,169 1(59)	5,63 (18)	1,080 2(27)	1
260717-1647024	980,0(10)	1,168 3(59)	5,66 (19)	1,079 8(50)	1

V tabulce 2.19 jsou uvedeny hodnoty vypočtených poměrů $R_{t,0}/R_{t,z}$ podle vztahu (2.13) s uvažováním hustoty čerstvé zeminy ρ_ε a polotloušťky D podle vztahu (2.14). Použitím nalezených koeficientů q z tabulky 2.18 a hodnot aktivit A'_m z tabulky 2.15 byly vztahem $A_m = qA'_m$ nalezeny výsledné hodnoty aktivit ^{137}Cs na kilogram půdy v jejích jednotlivých vrstvách. Tyto hodnoty byly vneseny do grafu na obrázku 2.21, a to v závislosti na hloubce pod vrchní hranicí mechového porostu.

Tabulka 2.19: Výsledné hodnoty aktivity ^{137}Cs

Vzorek	h [cm]	ρ_ε [kg·m ⁻³]	$R_{t,0}/R_{t,z}$	D [cm]	A_m [Bq·kg ⁻¹]
Mech	0,50	709,3(71)	1,122 1(57)	7,64(34)	22,66(57)
L1	1,25	797,0(80)	1,137 1(57)	6,85(27)	63,2(14)
L2	4,58	1160(12)	1,199 1(60)	4,85(14)	295,4(57)
A	7,92	1227(27)	1,210 4(61)	4,61(12)	331(13)
B1	9,78	1316(14)	1,225 6(62)	4,33(11)	160,9(32)
B2	13,9	1367(14)	1,234 3(62)	4,18(10)	45,02(90)
B3	18,5	1465(15)	1,251 1(63)	3,930(88)	12,99(16)
B4	22,9	1376(14)	1,235 9(62)	4,157(99)	6,84(18)
B5	27,3	1471(15)	1,252 0(63)	3,916(88)	3,53(10)
B6	30,6	1607(35)	1,275 2(64)	3,621(75)	2,383(93)

V závislosti na hloubce h byly hodnoty aktivity ^{137}Cs v kilogramu hmoty z tabulky 2.19 vneseny do grafu na obrázku 2.21.



Obrázek 2.21: Graf aktivity ^{137}Cs na kilogram půdy v závislosti na hloubce pod povrchem

2.6 Výpočet plošné kontaminace půdy izotopem ^{137}Cs

Pro výpočet plošné kontaminace ^{137}Cs je nejprve nutný výpočet aktivity v každé vrstvě zkoumané půdy, a to přepočtem hmotnostní aktivity A_m na plošnou aktivitu A_S v kvádrových výsečích každé vrstvy půdy o výšce H a čtvercové podstavě o straně 1 m. Tato hodnota pak představuje celkovou aktivitu dané vrstvy o půdorysu 1 m². Tento přepočet proběhl podle vztahu:

$$A_S = \frac{A_m m}{S}; \quad m = SH\rho_{\xi}; \quad S = 1\text{m}^2, \quad (2.17)$$

kde m je hmotnost dané výseče půdy o výšce H a ploše podstav S . Výsledky tohoto vztahu jsou zapsány v tabulce 2.20.

Tabulka 2.20: Vypočtené celkové hodnoty aktivity ^{137}Cs v objemu každé vrstvy o obsahu podstav 1 m^2 a tloušťkách vrstev H

Vrstva	H [cm]	ρ_ε [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	A_S [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$]
Mech	1,00	709,3(71)	160,7(44)
L1	0,50	797,0(80)	252,0(59)
L2	6,17	1160(12)	21 140(460)
A	0,50	1227(27)	2030(91)
B1	3,21	1316(14)	6790(150)
B2	5,13	1367(14)	3154(70)
B3	4,00	1465(15)	761(12)
B4	4,75	1376(14)	447(13)
B5	4,00	1471(15)	208,0(63)
B6	2,75	1607(35)	105,3(47)

Plošná kontaminace ^{137}Cs získaná součtem naměřených hodnot plošné aktivity A_S z každé vrstvy podle tabulky 2.20 je:

$$A_S = (35,0 \pm 1,0) \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2},$$

kde je uvedena rozšířená nejistota měření plošné kontaminace.

Pro získání hodnoty povrchové aktivity každého ze zkoumaných radioizotopů cesia pouhý součet A_S každé vrstvy není dostačující. Kvůli pohltivosti půdy by přímo nad místem sběru vzorků byla naměřena nižší hodnota povrchové kontaminace. Do výpočtu je nezbytné zahrnutí polotloušťky D vrstev a jejich výšek H . Záření se v půdním profilu šíří všemi směry. Zvolená metoda ale využívá zjednodušený jednorozměrný model uvažující příspěvky hodnot aktivit ze všech vrstev. Příspěvek aktivity nižší vrstvy včetně příspěvku uvažované vrstvy byl vypočten ze vztahu, ve kterém i je pořadí vrstvy od nejnižší položené. Celkový příspěvek aktivity na hranici vrstev i a $i+1$ je vyjádřen veličinou:

$$A_{S,i+1} = \frac{A'_{S,i}}{A_{S,i}} A_{S,i} + A_{S,i-1} e^{\frac{-\ln 2}{D_i} H_i}, \quad (2.18)$$

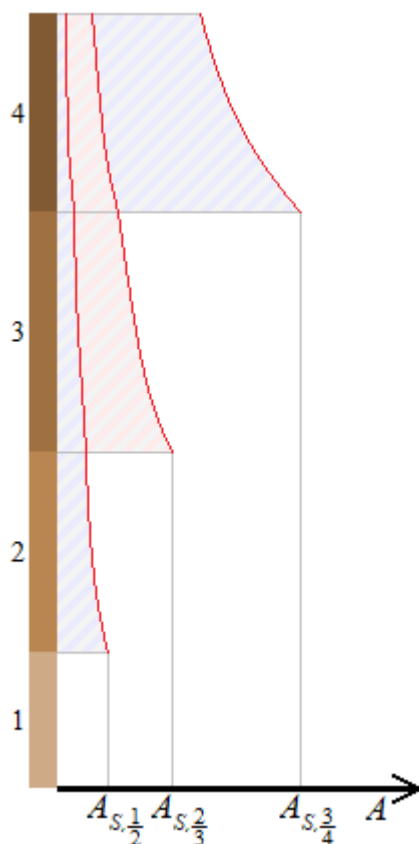
kde zlomek v dolním indexu značí hranici vrstev i a $i+1$. První člen pravé strany vztahu (2.18) vychází z modelu jednorozměrného zdroje popsaném na obrázku 2.4. Předpokládejme, že vrstva i se chová jako zdroj, který zároveň vyzařované záření pohlcuje. Druhý člen přičítá příspěvek aktivity z níže položené vrstvy $i-1$ potom, co je část aktivity vrstvou i pohlcena. Model je znázorněn na obrázku 2.22, kde hodnoty zvýrazněné na horizontální ose představují hodnoty aktivity, která by byla naměřena po prozáření fotonů z hlouběji uložených vrstev. Tvar prvního členu pravé strany vztahu (2.18) vychází z upraveného vztahu (2.13), a platí:

$$\frac{A'_{S,i}}{A_{S,i}} = \frac{-\frac{D_i}{\ln 2} \left(e^{\frac{-\ln 2}{D_i} H_i} - 1 \right)}{H_i}. \quad (2.19)$$

Plošná kontaminace půdy radionuklidem ^{137}Cs byla podle vztahu (2.18) nalezena postupně od nejnižší položené vrstvy až po povrch:

$$\begin{aligned}
 A_{S, \frac{1}{2}} &= \frac{A'_{S,1}}{A_{S,1}} A_{S,1} \\
 A_{S, \frac{2}{3}} &= \frac{A'_{S,2}}{A_{S,2}} A_{S,2} + A_{S, \frac{1}{2}} e^{\frac{\ln 2}{D_2} H_2} \\
 A_{S, \frac{3}{4}} &= \frac{A'_{S,3}}{A_{S,3}} A_{S,3} + A_{S, \frac{2}{3}} e^{\frac{\ln 2}{D_3} H_3} \\
 &\vdots \\
 A_{S, \frac{10}{\text{povrch}}} &= \frac{A'_{S,10}}{A_{S,10}} A_{S,10} + A_{S, \frac{9}{10}} e^{\frac{\ln 2}{D_{10}} H_{10}}.
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

V první rovnici se druhý člen pravé strany nevyskytuje, protože se týká nejnižší zkoumané vrstvy a příspěvek z větší hloubky je považován za nulový. Výsledky každého kroku jsou uvedeny v tabulce 2.21 jako aktivita, která by byla naměřena na svrchní hranici každé z vrstev, pokud by byly započteny příspěvky aktivity z hlubších vrstev. Výsledek poslední rovnice pro $i = 10$ představuje hledanou povrchovou aktivitu A_S .



Obrázek 2.22: Pokles naměřené aktivity po prostupu fotonů půdou směrem k povrchu. Tento náčrt zahrnuje čtyři nejhluběji uložené vrstvy.

Tabulka 2.21: Vrstvy půdy v pořadí od nejhlubší po povrchovou s hodnotami aktivity, která by byla zjištěna podle postupu (2.20).

i	Vrstva	H [cm]	ρ_e [kg·m ⁻³]	D [cm]	A_S'/A_S	$A_{S,i}$ [Bq·m ⁻²]
1	B6	2,75	1607(35)	3,621(75)	0,777(12)	81,9(39)
2	B5	4,00	1471(15)	3,917(88)	0,717(14)	189,4(20)
3	B4	4,75	1376(14)	4,157(99)	0,691(14)	394,7(18)
4	B3	4,00	1465(15)	3,930(88)	0,717(14)	741,1(32)
5	B2	5,13	1367(14)	4,18(10)	0,674(14)	2 441,8(65)
6	B1	3,21	1316(14)	4,33(11)	0,782(15)	6772(19)
7	A	0,50	1227(27)	4,61(12)	0,963(24)	8238(22)
8	L2	6,17	1160(12)	4,85(14)	0,665(17)	17 459(84)
9	L1	0,50	797,0(80)	6,85(27)	0,975(36)	16 844(86)
10	Mech	1,00	709,3(71)	7,64(34)	0,956 0(19)	15 537(99)

Hodnota aktivity ^{137}Cs , která by byla naměřena na povrchu, pokud by byla zvažována pohltivost každé z hodnocených vrstev. Jedná se o hodnotu z tabulky 2.21 pro $i = 10$. Nejistota výsledku byla rozšířena dvakrát:

$$A_S = (15,54 \pm 0,19) \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$$

2.7 Data z měření provedených v roce 2015

Ve dnech 1. až 3. června 2015 byly ze stejné lokality sběru nashromážděny vzorky z pěti bodů. Sběr vzorků byl proveden stejným způsobem, tedy odhrabováním vrstev půdy z vymezené čtvercové plochy o straně 35 cm. Kopáno bylo do hloubky 42 cm. Odebrané vzorky byly vysušeny a spektrometrem gama záření RT-50 od firmy Georadis s.r.o. byla vyhodnocena v nich přítomná aktivita radiocesia [31]. Hodnoty aktivity k roku 2015 v těchto bodech v udávají tabulky 2.22 a 2.23. Plošná kontaminace těchto bodů je uvedena v tabulce 2.24.

Tabulka 2.22: Hodnoty aktivit ^{137}Cs v půdních profilech, kde hodnoty h' jsou hloubky spodních hranic vrstev a h jsou hloubky středu dané vrstvy.

h' [cm]	h [cm]	A_m [Bq·kg ⁻¹]			
		bod č. 1	bod č. 3	bod č. 4	bod č. 5
3	1,5	506	565	499	874
6	4,5	369	919	781	353
10	8,0	132	202	315	92
14	12	55	97	109	41
18	16	23	27	41	29
22	20	21	16	11	11
26	24	5	4	7	0
30	28	3	0	8	0
34	32	7	0	9	3
38	36	0	0	7	0
42	40	4	0	4	0

Tabulka 2.23: Aktivita ^{137}Cs ve vrstevných půdy v bodě č. 2

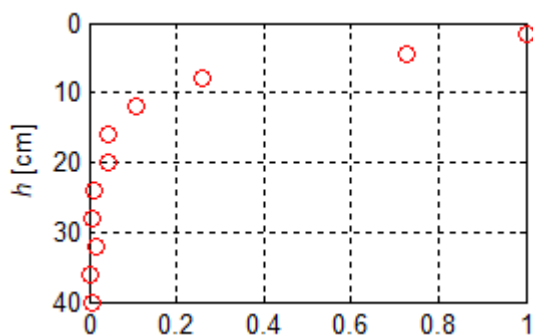
h' [cm]	h [cm]	A_m [Bq·kg ⁻¹]
3	1,5	591
6	4,5	1563
10	8,0	432
14	12	114
18	16	37
22	20	8
28	25	0
32	30	4
37	34	0
42	39	3

Tabulka 2.24: Povrchová kontaminace ^{137}Cs v bodech měření z počátku června roku 2015

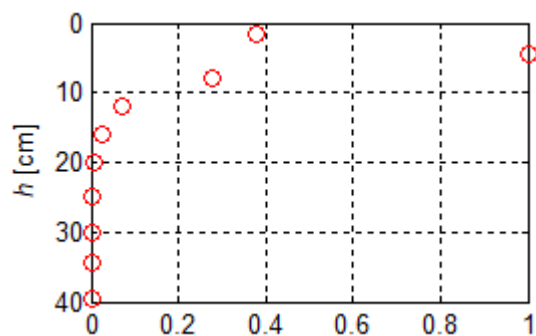
bod č.	A_s [kBq·m ⁻²]
1	17,41
2	53,27
3	31,69
4	23,30
5	16,31

2.7.1 Prosakování cesia hlouběji do půdy

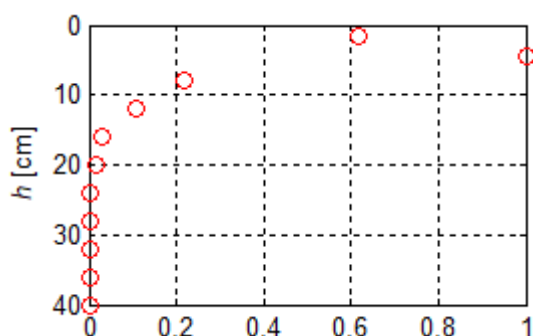
Do grafů na obrázcích 2.23 až 2.27 byly hodnoty koncentrace ^{137}Cs v závislosti na hloubce (Tabulky 2.22 a 2.23) vloženy po normování tak, aby maxima množství ^{137}Cs v kilogramu hmoty odpovídala hodnotě 1 na horizontální ose. Pro srovnání byly stejným způsobem do grafu na obrázku 2.28 vloženy i nově naměřené hodnoty z roku 2019 (Tabulka 2.19).



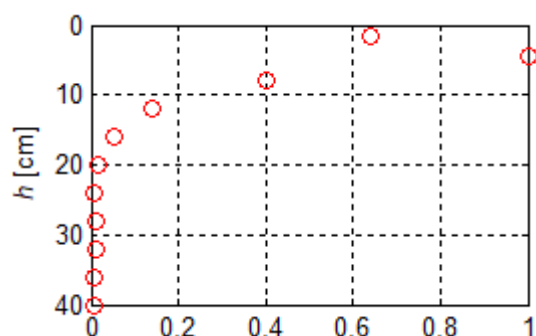
Obrázek 2.23: Profil ^{137}Cs v bodě 1



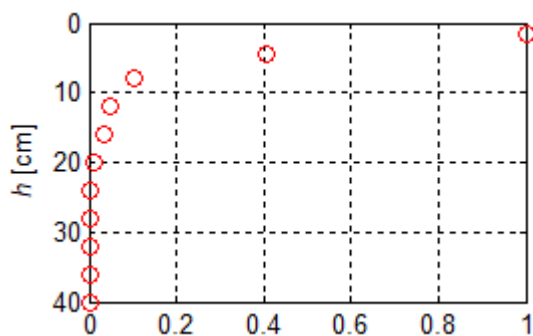
Obrázek 2.24: Profil ^{137}Cs v bodě 2



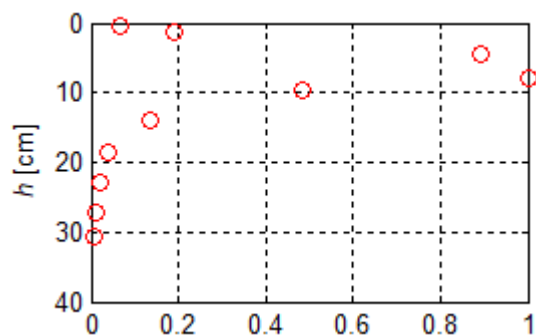
Obrázek 2.25: Profil ^{137}Cs v bodě 3



Obrázek 2.26: Profil ^{137}Cs v bodě 4



Obrázek 2.27: Profil ^{137}Cs v bodě 5



Obrázek 2.28: Profil ^{137}Cs v bodě nového měření

3 Určení a výpočet nejistot

Pro výpočet nejistot dílčích a konečných výsledků byl použit Gaussův zákon šíření nejistot, tedy vztah:

$$u_w = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial w}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2}. \quad (3.1)$$

V tomto vztahu vystupuje w , a to jako funkce několika proměnných x_i , kde u_{x_i} je nejistota konkrétní proměnné x_i a u_w je nejistota výsledné hodnoty získané výpočtem funkce w . Pro všechny veličiny napsané v tabulkách jsou jejich nejistoty zapsány v závorce za hodnotou dané veličiny, jako například $A_m = 63,2(14) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Nejistoty nebyly rozšířeny, pokud není řečeno jinak.

V tabulce 2.1: Hodnoty hloubky spodní hranice každé vrstvy h' byly vypočítány jako aritmetický průměr čtyř hodnot měřených od vrchu mechového porostu. Výsledek byl uveden na tři platná místa bez uvažování nejistot. Pro hloubky středů vrstev h rovněž nejistoty nebyly uvažovány.

Hmotnosti m , m_s a m_ε byly měřeny pomocí vah s nejistotou $u_m = 0,01 \text{ g}$. Tato nejistota je pro všechny hodnoty hmotnosti stejná a nebyla proto v tabulkách vůbec uvedena.

Nejistota objemu Marinelliho nádob o objemu $V = 450 \text{ cm}^3$ byla převzata z certifikátů kalibračních etalonů a platí pro ni $u_V = 4,5 \text{ cm}^3$. Pro Marinelliho nádoby o objemu $V = 700 \text{ cm}^3$ byla nejistota $u_V = 15 \text{ cm}^3$ odhadnuta.

Hustoty suchých vzorků byly vypočteny vztahem (2.1) a pro jejich nejistoty platí:

$$u_{\rho_s} = 1000 \frac{m_s}{V} \sqrt{\left(\frac{u_m}{m_s} \right)^2 + \left(\frac{u_V}{V} \right)^2}. \quad (3.2)$$

Hustoty čerstvých vzorků byly vypočteny vztahem (2.2) a pro jejich nejistoty platí:

$$u_{\rho_\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_\varepsilon}{\partial m_\varepsilon} u_m \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_\varepsilon}{\partial m_s} u_m \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_\varepsilon}{\partial \rho_s} u_{\rho_s} \right)^2}, \quad (3.2)$$

kde po provedení derivací vztahu (2.2) podle dílčích veličin získáme:

$$u_{\rho_\varepsilon} = \sqrt{(m_s \rho_s u_m)^2 + \left(\frac{-m_\varepsilon}{m_s^2} \rho_s u_m \right)^2 + \left(\frac{m_\varepsilon}{m_s} u_{\rho_s} \right)^2}. \quad (3.3)$$

Relativní nejistoty $u_{r,R}$ počtu registrovaných fotonů R v celém souhrnu měření jsou výstupy zpracování těchto měření pomocí softwarů Genie2000 a SpectraLineGP. Tato nejistota je stejná i pro hodnoty počtu registrovaných fotonů za sekundu, tedy pro R_s . Pro potřeby určení nejistot hodnot, které na těchto jednotkách závisí, však byly tyto relativní nejistoty převedeny na absolutní.

Účinnost detekce gama záření ε byla určena vztahem (2.7). Pro nejistoty této účinnosti platí:

$$u_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial R_t} u_{R_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial A} u_A\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial P_{\gamma}} u_{P_{\gamma}}\right)^2}, \quad (3.4)$$

kde hodnoty u_A byly získány převodem relativních nejistot aktivit $u_{r,A}$ radionuklidů kalibračních etalonů z tabulek 2.10 a 2.13. Po provedení derivací vztahu (2.7) podle dílčích veličin získáme:

$$u_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{100}{AP_{\gamma}} u_{R_t}\right)^2 + \left(\frac{-100R_t}{A^2 P_{\gamma}} u_A\right)^2 + \left(\frac{-100R_t}{AP_{\gamma}^2} u_{P_{\gamma}}\right)^2}, \quad (3.5)$$

Pro nejistoty hodnot aktivity A' v tabulce 2.15 platí:

$$u_{A'} = \sqrt{\left(\frac{\partial A'}{\partial R_t} u_{R_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial A'}{\partial \varepsilon} u_{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\partial A'}{\partial P_{\gamma}} u_{P_{\gamma}}\right)^2}, \quad (3.6)$$

kde po provedení derivací vztahu (2.8) podle dílčích veličin získáme:

$$u_{A'} = \sqrt{\left(\frac{100}{\varepsilon P_{\gamma}} u_{R_t}\right)^2 + \left(\frac{-100R_t}{\varepsilon^2 P_{\gamma}} u_{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{-100R_t}{\varepsilon P_{\gamma}^2} u_{P_{\gamma}}\right)^2}. \quad (3.7)$$

Pro nejistoty hodnot aktivity A'_m v tabulce 2.15 platí:

$$u_{A'_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial A'_m}{\partial A'} u_{A'}\right)^2 + \left(\frac{\partial A'_m}{\partial V} u_V\right)^2 + \left(\frac{\partial A'_m}{\partial \rho_{\varepsilon}} u_{\rho_{\varepsilon}}\right)^2}. \quad (3.8)$$

Po výpočtu derivací vztahu (2.9) bude vztah (3.8) mít tvar:

$$u_{A'_m} = \sqrt{\left(\frac{10^6}{V\rho_{\varepsilon}} u_{A'}\right)^2 + \left(\frac{-10^6}{V^2\rho_{\varepsilon}} u_V\right)^2 + \left(\frac{-10^6}{V\rho_{\varepsilon}^2} u_{\rho_{\varepsilon}}\right)^2}. \quad (3.9)$$

V tabulce 2.17: Nejistoty hodnot $R_{t,v,z}$, $R_{t,v}$ a $R_{t,z}$ jsou výstupem zpracování měření softwarem Genie2000. Pro poměr $R_{t,0}/R_{t,z}$ byla nejistota vypočtena ze vztahu:

$$u_{R_{t,0}/R_{t,z}} = \frac{R_{t,0}}{R_{t,z}} \sqrt{\left(\frac{u_{R_{t,0}}}{R_{t,0}}\right)^2 + \left(\frac{u_{R_{t,z}}}{R_{t,z}}\right)^2}. \quad (3.10)$$

Relativní nejistota $R_{t,0}/R_{t,z}$ pro poměry následně určeny podle vztahu (2.14) byla odhadnuta jako 5 %. Taková totiž byla nejvyšší relativní nejistota poměru $R_{t,0}/R_{t,z}$ v tabulce 2.17, a byla taková pro vzorek z vrstvy B5.

Nejistota polotlouštěk vzorků byla vypočtena za pomoci následující derivace vztahu (2.15):

$$u_D = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial \left(\frac{R_{t,z}}{R_{t,0}}\right)} u_{R_{t,0}/R_{t,z}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\frac{-d \ln 2}{\frac{R_{t,0}}{R_{t,z}} \left(\ln \frac{R_{t,0}}{R_{t,z}}\right)^2} u_{R_{t,0}/R_{t,z}}}{\frac{R_{t,0}}{R_{t,z}} \left(\ln \frac{R_{t,0}}{R_{t,z}}\right)^2} u_{R_{t,0}/R_{t,z}}\right)^2} = \left| \frac{-d \ln 2}{\frac{R_{t,0}}{R_{t,z}} \left(\ln \frac{R_{t,0}}{R_{t,z}}\right)^2} u_{R_{t,0}/R_{t,z}} \right|, \quad (3.11)$$

kde nejistota tloušťky vzorku d nebyla uvažována.

Nejistota poměrů A/A' v tabulce 2.18 byla vypočtena podle:

$$u_{A/A'} = \sqrt{\left(\frac{\partial \left(\frac{A}{A'}\right)}{\partial D} u_D\right)^2} = \left| \frac{\partial \left(\frac{A}{A'}\right)}{\partial D} u_D \right|, \quad (3.12)$$

kde derivace poměru A/A' podle D má tvar:

$$\frac{\partial \left(\frac{A}{A'}\right)}{\partial D} = -d \left(-\frac{D}{\ln 2} e^{\frac{-\ln 2}{D} d} + \frac{D}{\ln 2} \right)^2 \left(\frac{-e^{\frac{-\ln 2}{D} d}}{\ln 2} - \frac{D}{\ln 2} e^{\frac{-\ln 2}{D} d} \frac{\ln 2}{D^2} d + \frac{1}{\ln 2} \right). \quad (3.13)$$

Pro nejistoty koeficientů q v tabulce 2.18 platí:

$$u_q = \frac{A/A'}{A_E/A'_E} \sqrt{\left(\frac{u_{A/A'}}{A/A'}\right)^2 + \left(\frac{u_{A_E/A'_E}}{A_E/A'_E}\right)^2}, \quad (3.14)$$

kde jako A_E/A'_E byl označen poměr skutečné a registrované aktivity pro kalibrační etalony. Pro nejistotu aktivity ^{137}Cs na kilogram v tabulce 2.19 platí:

$$u_{A_m} = q A'_m \sqrt{\left(\frac{u_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{u_{A'_m}}{A'_m}\right)^2}. \quad (3.15)$$

Pro nejistotu plošné kontaminace jednotlivých vrstev uvedených v tabulce 2.20 platí:

$$u_{A_S} = S H A_m \rho_{\check{c}} \sqrt{\left(\frac{u_{A_m}}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_{\check{c}}}}{\rho_{\check{c}}}\right)^2}. \quad (3.16)$$

Nejistota výsledné plošné kontaminace následující za tabulkou 2.20 byla vypočtena z nejistot plošné kontaminace jednotlivých vrstev z tabulky 2.20 podle pravidla pro sčítání hodnot s nejistotami a výsledek byl rozšířen dvakrát:

$$U_{A_S} = 2 \sqrt{\sum u_{A_{S,i}}^2}. \quad (3.17)$$

Nejistota výsledku vztahu (2.18) vyjadřujícího poměr aktivity ve vrstvě k aktivitě, která danou vrstvou prostoupí, je vyjádřena vztahem:

$$\frac{u_{A'_{S,i}}}{A'_{S,i}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \left(\frac{A'_{S,i}}{A'_{S,i}}\right)}{\partial D_i} u_{D_i}\right)^2} = \left| \frac{\partial \left(\frac{A'_{S,i}}{A'_{S,i}}\right)}{\partial D_i} u_{D_i} \right|, \quad (3.18)$$

kde derivace poměru podle polotloušťky má tvar:

$$\frac{\partial \left(\frac{A'_{S,i}}{A_{S,i}} \right)}{\partial D_i} = \frac{1}{H_i} \left(\frac{-1}{\ln 2} e^{\frac{-\ln 2}{D_i} H_i} - \frac{1}{D_i} e^{\frac{-\ln 2}{D_i} H_i} + \frac{1}{\ln 2} \right). \quad (3.19)$$

Pro nejistotu plošné aktivity prostupující z nejspodnější vrstvy na její svrchní rozhraní (první hodnota sloupce tabulky 2.22 nejvíce vpravo) platí následující vztah, kde $i = 1$:

$$u_{A_{S,i}} = A_{S,i} \frac{A'_{S,i}}{A_{S,i}} \sqrt{\left(\frac{u_{A_{S,i}}}{A_{S,i}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{u_{A'_{S,i}}}{A_{S,i}}}{\frac{A'_{S,i}}{A_{S,i}}} \right)^2}. \quad (3.20)$$

Pro nejistotu vztahu (2.17), tedy plošné aktivity prostupující zespod na svrchní hranici vrstvy $i + 1$ platí následující vztah, kde hodnoty $u_{A_{S,i}}$ a $A_{S,i}$ se vztahují k předcházející vrstvě i :

$$u_{A_{S,i+1}} = \sqrt{\left(e^{\frac{-\ln 2}{D_{i+1}} H_{i+1}} u_{A_{S,i}} \right)^2 + \left[e^{\frac{-\ln 2}{D_{i+1}} H_{i+1}} - \left(A_{S,i} e^{\frac{-\ln 2}{D_{i+1}} H_{i+1}} \frac{\ln 2}{D_{i+1}^2} H_{i+1} u_{D_{i+1}} \right) \right]^2}. \quad (3.21)$$

4 Závěr

V místě o souřadnicích 49°33'36" N, 16°10'52" E v blízkosti obce Bohuňov v Kraji Vysočina byly shromážděny vzorky mechu a půdy ze čtvercového výkopu do hloubky 32 cm. Bod sběru se nacházel ve smrkovém lese, ve kterém v minulosti probíhaly sběry podobného charakteru. Po přípravě vzorků k měření a zpracování následně získaných dat byla změřena plošná kontaminace radionuklidem ^{137}Cs v místě sběru a její hodnota činí $(35,0 \pm 1,0) \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$. Zahrnutím pohltivosti půdních vrstev by z této hodnoty bylo k povrchu prozářeno $(15,54 \pm 0,19) \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$. Využitím zákona radioaktivní přeměny, tedy vztahu (1.2), by plošná kontaminace ^{137}Cs v době bezprostředně po havárii měla ve stejném bodu sběru být $76 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$.

Radionuklid ^{134}Cs nebyl v sebraných půdních vzorcích vůbec detekován. Využitím hodnot celkových množství radionuklidů uvolněných z Černobyli, které jsou uvedeny v tabulce 1.1, a za předpokladu rovnoměrného zamoření ^{134}Cs a ^{137}Cs na velkém území by poměr mezi zamořením těmito radioizotopy měl bezprostředně po havárii být 0,635. Srovnáním se zpětně dopočteným zamořením izotopem ^{137}Cs by plošná kontaminace ^{134}Cs měla v dubnu roku 1986 být $48 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$. Jelikož má ^{134}Cs poločas přeměny jen 2,0684 let, tak by jej koncem roku 2019 mělo v místě sběru být jen $0,6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$.

Vzájemná vzdálenost pěti bodů měření provedených na stejném místě v červnu 2015 se pohybovala v metrech až v nízkých hodnotách desítek metrů. Místo sběru se vyznačovalo silně nehomogenní povrchovou kontaminací radiocesiumem, a to od $16,31$ do $53,27 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$. Aritmetický průměr těchto pěti hodnot uvedených v tabulce 2.24 je $28,40 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota je vyšší než výsledek nově provedeného měření a zákon radioaktivní přeměny nemohl tedy být ověřen, a to i kvůli samotné nehomogenitě zamoření lokality sběru vzorků. K ověření tohoto zákona by mohla posloužit měření provedena v lokalitě kontaminované rovnoměrně, která by následně byla srovnána s novými měřeními provedenými na vzorcích nasbíraných z více bodů o malých vzájemných vzdálenostech. Homogenně kontaminovanou lokalitou by mohly být například horské louky s přítomností jen několika málo druhů rostlin, což smrkový les, ve kterém byl proveden sběr měřených vzorků, není.

Po uplynutí doby čtyř a půl let je patrné prosakování ^{137}Cs , což má za následek posun maximální hodnoty hmotnostní aktivity do větší hloubky, a to o 3 až 6 cm. Pokud by tato rychlost prosakování byla konstantní v období od roku 1986 do současnosti, musela by maximální koncentrace cesia být v hloubce přibližně mezi 20 až 45 cm. Rychlost prosakování cesia do hloubky se může v různých bodech lišit, stejně jako úroveň jejich plošné kontaminace, proto může být analýza prosakování cesia nespolehlivá. Měření však potvrzuje tvrzení v podkapitole 1.4, že rostliny udržují cesium v povrchových vrstvách půdy.

Při korekci hodnot aktivity na hustotu měřených vzorků byla použita aproximace trojrozměrné Marinelliho nádoby se vzorkem na jednorozměrný zdroj záření. Přesnější a spolehlivější korekce by mohla být provedena počítačovým simulováním geometrie měření.

Literatura

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. Druhé přepracované vydání, svazek 2. VUTIUM: 2013. ISBN 978-80-214-4123-1
- [2] KAMAL, Anwar. *Nuclear Physics*. DOI 10.1007/978-3-642-38655-8. Berlin: Springer-Verlag, 2014. ISBN 978-3-642-38655-8
- [3] NAVE, Carl Rod. *Nuclear Fission Fragments* [online]. c2017, [cit.2020-01-12]. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fisfrag.html>>
- [4] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná fyzika, radiační fyzika, radionuklidy* [online]. [cit.2020-01-10]. <<http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>>
- [5] NAVE, Carl Rod. *Potassium-Argon Dating* [online]. c2017, [cit.2020-01-10]. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/KAr.html>>
- [6] *Radioactive Decay | Radiation Protection | US EPA* [online]. c2020, poslední revize 28.5.2019 [cit.2020-01-16]. <<https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay>>
- [7] ATWOOD, David A. *Radionuclides in the Environment*. Chichester: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-71434-8
- [8] *What is Carbon-14 (14C) Dating? Carbon Dating Definition* [online]. c2020, [cit.2020-01-10]. <<https://www.radiocarbon.com/about-carbon-dating.htm>>
- [9] *Bomb Carbon Effect, Radiocarbon Testing – Beta Analytic* [online]. c2020, [cit.2020-02-05]. <<https://www.radiocarbon.com/carbon-dating-bomb-carbon.htm>>
- [10] FULAJTAR, Emil. *Use of ¹³⁷Cs for soil erosion assessment*. 2017. ISBN 978-92-5-130050
- [11] *Chornobyl Center - on problems of nuclear safety, radioactive waste and radioecology* [online]. 18.1.2018 [cit.2020-02-11], <<http://www.chornobyl.net/>>
- [12] ŠTULLER, Ján. *10 let od havárie jaderného reaktoru v Černobyli – důsledky a poučení* [online]. 1996, [cit.2020-02-09]. <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/10let_od_Cernobyli.pdf>
- [13] *Sarcophagus | The Chernobyl Gallery* [online]. c2020 [cit.2020-02-10], <<http://www.chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/sarcophagus/>>
- [14] *Chernobyl confinement structure systems begin operation* [online]. 8. 2. 2019 [cit.2020-02-10], <<https://world-nuclear-news.org/Articles/Chernobyl-confinement-structure-systems-begin-oper>>
- [15] KATO, Hiroaki. *Reconstructed initial fallout map of the Fukushima accident-derived radiocesium* [online]. c2018, [cit.2020-02-28]. <<http://www.ied.tsukuba.ac.jp/~fukushimafallout/>>
- [16] *Vznik a vývoj havárie na jaderné elektrárně Fukushima Dai-ichi* [online]. 8. 3. 2012 [cit.2020-02-27], <<https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/Fukusima/Vznikhavarie.pdf>>
- [17] *Havárie v Černobyli je s Fukušimou nesrovnatelná* [online]. 14. 4. 2011 [cit.2020-03-01], <<https://www.sujb.cz/aktualne/detail/clanek/havarie-v-cernobyli-je-s-fukusimou-nesrovnatelna/>>
- [18] *EURDEP steps up monitoring of post-Fukushima radiation* [online]. 17. 6. 2011 [cit.2020-03-07], <<https://ec.europa.eu/jrc/en/news/eurdep-steps-monitoring-post-fukushima-radiation-7181>>
- [19] *Comparison of Estimated Amounts of Released Radionuclides between Chernobyl and Fukushima Daiichi NPS Accidents* [online]. 31. 3. 2017 [cit.2020-03-07], <<https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/1st/02-02-05.html>>

- [20] *Stručný přehled biologických účinků záření* [online]. c2019, [cit.2020-03-08].
<<https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologickych-ucinku-zareni/>>
- [21] PETROVÁ, Karla. *Zabezpečení osobního monitorování při činnostech vedoucích k ozáření* [online]. 2005, [cit.2020-03-09].
<https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Zabezpeceni_os_monit_pri_ozareni.pdf>
- [22] ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření* [online]. 2005, [cit.2020-03-12].
<<https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/050/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/zareni.pdf>>
- [23] *Radiation exposure: a quick guide to what each level means* [online]. c2016, [cit.2020-03-15].
<<https://www.theguardian.com/news/datablog/2011/mar/15/radiation-exposure-levels-guide>>
- [24] DE CORT, Marc. *Atlas of Caesium 137 deposition on Europe after the Chernobyl accident*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998. ISBN 92-828-3140-X
- [25] *Základní informace o RADONU* [online]. c2020, [cit.2020-03-20].
<<https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace>>
- [26] Více o zdravotních účincích RADONU [online]. c2020, [cit.2020-03-20].
<<https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/zdravotni-ucinky-radonu>>
- [27] *Radioactive Fallout from Global Weapons Testing* [online]. poslední revize 6. 1. 2014 [cit.2020-03-23], <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/fallout/rf-gwt_home.htm>
- [28] *WWW Table of Radioactive isotopes*. 1998, [cit.2020-02-12].
<<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=380090>>
- [29] *Decay Data Search* [online]. 1998, [cit.2019-12-28]. <<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>>
- [30] *Germanium Detectors* [online]. c2020, [cit.2020-04-22].
<<https://www.mirion.com/products/germanium-detectors>>
- [31] *Měření Cs na kalibračním bodě blízkosti Skalského rybníka (kraj Vysočina)*. Olomouc: Katedra geologie, Přírodovědecká fakulta UP, 2015
- [32] OpenStreetMap contributors. *OpenStreetMap* [online]. [cit.2020-05-05].
<<https://www.openstreetmap.org>>
- [33] GILMORE, Gordon R. *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. 2nd Edition. 2008. ISBN 978-0-470-86196-7
- [34] HAYNES, William M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data*. 95th Edition. 2014. ISBN 978-1-4822-0868-9
- [35] *Certifikát č. 9031-OL-563/13*. Praha 10: Český metrologický institut, 23. 8. 2017.
- [36] *Certifikát č. 1035-SE-40518-17*. Praha 10: Český metrologický institut, 23. 8. 2017.